

해수의 영향에 따른 이수식 TBM의 슬러리 관리를 위한 기초적 연구

김대영^{1*} · 이재원² · 정재훈² · 강한별² · 지성현³

¹정회원, 현대건설 연구개발본부 부장

²비회원, 현대건설 연구개발본부 대리

³비회원, 현대건설 연구개발본부 부장대우

A fundamental study of slurry management for slurry shield TBM by sea water influence

Dae-Young Kim^{1*} · Jae-won Lee² · Jae-Hoon Jung² · Han-Byul Kang² · Sung-Hyun Jee³

¹Member, General Manager., Dept. of R&D., Hyundai Engineering & Construction

²Assistant Manager., Dept. of R&D., Hyundai Engineering & Construction

³General Manager., Dept. of R&D., Hyundai Engineering & Construction

*Corresponding Author : Dae-Young Kim, dykim@hdec.co.kr

Abstract

Bentonite swells when it comes into contact with water and makes it a viscous fluid. Thus it is widely used in civil engineering works for waterproofing. Utilizing the properties of bentonite, the slurry shield TBM supports excavated face with pressurized slurry as well as transporting excavated muck. When bentonite is in contact with seawater, due to the change of double layer thickness, its expandability and viscosity are lowered. This may cause problems for excavation stability and muck discharge due to the increase of sea water inflow when Slurry TBM is used under sea water conditions. In this study, the change of slurry condition caused by the inflow of sea water during tunnel excavation with Slurry TBM was investigated and a slurry management guideline was proposed. For this purpose, a laboratory test was carried out based on the slurry management criterions applied in the field, and a method applicable to the field where sea water is affected has been proposed.

Keywords: Slurry, TBM, Bentonite, Sea water

초 록

벤토나이트는 물과 접촉하면 팽창하고 점성을 발휘하는 성질이 있어 일반적으로 차수가 필요한 토목공사에 많이 활용되고 있다. 이수식 TBM에서는 이와 같은 성질을 활용하여 가압된 슬러리로 불투수성 막을 형성하고 굴착벽면의 붕괴를 방지하는 동시에 굴착된 버력을 운송하며 굴착을 수행한다. 하지만 벤토나이트는 해수와 접촉할 경우 팽창성이 저하되어 그 성질을 발휘하지 못하는 문제가 있다. 이는 해수 조건에서 이수식 TBM으로 터널을 굴착할 시 지하수 유입 증가로 인한 굴착 안정성 및 버력 배출에 문제를

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
19(3)463-473(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.3.463>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 14, 2017

Revised May 9, 2017

Accepted May 16, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초래할 수 있다. 본 연구에서는 이수식 TBM으로 터널을 굴착 시 해수의 유입으로 인한 슬러리의 상태변화를 살펴보고 이에 대응하기 위한 슬러리 관리방안을 제시 하였다. 이를 위해 현장에서 적용된 슬러리 품질관리 기준을 바탕으로 실내 시험을 수행하였으며, 해수의 영향이 있는 현장에 적용 할 수 있는 방안을 제시하였다.

주요어: 슬러리, 이수식 TBM, 벤토나이트, 해수

1. 서론

셴드 TBM 공법은 막장압력을 대응하는 방법에 따라 토압식(EPB, Earth Pressure Balanced) TBM과 이수식(slurry shield)TBM으로 나뉜다(Park et al., 2016).

이수식 TBM은 굴진면에 작용하는 수압 및 토압보다 높은 슬러리압을 가해 굴진면의 안정을 확보한다. 또한 슬러리의 점성을 활용하여 굴착된 버력을 효율적으로 배출할 수 있기 때문에 투수성이 높고 수압이 큰 지반에서 많이 활용되고 있다(Roh et al., 2012; You et al., 2016).

슬러리는 기본적으로 물과 벤토나이트로 구성되며 시공 조건에 따라 첨가제가 추가되기도 한다. 벤토나이트는 물과 만나면 입자가 팽창하여 점성을 형성하는 성질이 있다(Oh et al., 2002). 이는 지반 굴착 시 벽면에 불투수성의 막을 형성하여 막장의 붕괴를 방지하는 역할을 한다. 하지만, 벤토나이트가 해수의 염분과 접촉하였을 때는 팽창성 저하 및 점도 상실 등으로 인해 이러한 특성을 발휘하지 못하는 문제가 있다.

해저터널과 같이 심도가 깊어 TBM에 작용하는 수압이 상당히 높을 경우, 수압에 상응하는 슬러리 압력을 유지하거나 관리하기 어려울 수 있다. 이와 같은 경우, TBM 굴착면에서 유입되는 해수에 대한 차수능력이 저하될 수 있으며 커터헤드 전방에 슬러리 압력을 효과적으로 전달하기 어려울 수 있다. 또한 순환하고 있는 슬러리가 적정 점도를 발휘하지 못하여 막장 안정성 확보능력과 배토성능이 저하될 수 있으며, 이에 따라 송·배수관과 디스크 커터의 마모를 유발시켜 공사비용 및 다운타임을 증가 시킬 수 있다. 따라서, 이수식 TBM에서 슬러리의 특성을 이용해 굴착면의 안정성을 확보하고 관내 버력 운송 효율을 높이기 위해서는 슬러리의 성능을 유지관리 할 수 있는 방안이 필요하다.

2. 슬러리 관리 기준 및 시험 방법

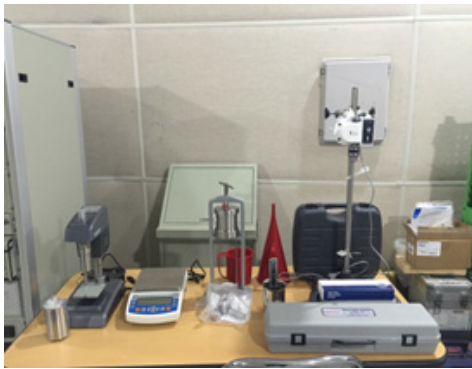
이수식 TBM에서는 순환하고 있는 슬러리에 대한 시험을 통하여 그 상태를 파악하고 벤토나이트 또는 첨가제를 투입함으로써 관리할 수 있다. 일반적으로 Mud Engineer가 지반상태에 따른 슬러리의 관리 기준을 제시하고, 주기적으로 슬러리의 상태를 측정하여 벤토나이트 또는 첨가제의 투입량을 결정한다. 그러나, 해수의 영향에 따른 슬러리의 명확한 관리 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 슬러리의 관리를 위해 필요한 영향 인자들을 파악하고 이를 기준으로 해수에 의한 슬러리의 상태 변화를 검토하였다.

기존 도심지의 TBM 프로젝트에서 실제로 적용하였던 슬러리의 상태 평가 기준 및 시험 방법을 채택하여 이를

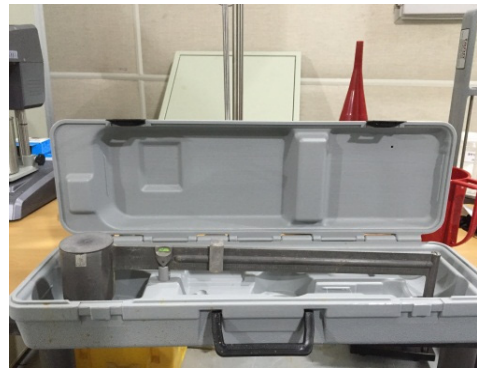
기준으로 해수에 의한 슬러리의 상태 변화를 검토하였다. 일반적인 슬러리의 품질관리 항목은 밀도, 점도, 필터 케이크 두께, 침투수량, 항복점, pH, 켈강도 등이 있다. 밀도, 점도, 항복점, 켈강도는 버력운송 능력을 확인할 수 있는 항목이며, 침투수량과 필터케이크는 막장압력 유지 능력을 확인할 수 있는 항목이다. 각 상태평가 항목별 관리기준과 영향 인자를 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1. Slurry evaluation items and criterions

Items	Density (ton/m ³)	Marsh Funnel Viscosity (Sec/lit)	Water Loss (mm)	Filter Cake (mm)	Yield Point (lbs/100ft ²)	pH	Gel Strength (lbs/100ft ²)	
							10sec	10min
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	



(a) Slurry test kits



(b) Mud balance



(c) Marsh Funnel tester



(d) Filter press



(e) Shearometer

Fig. 1. Test Equipment

현장에서 슬러리 상태평가를 하기 위한 시험장비(Fig. 1) 및 슬러리 상태평가 주요 항목별 내용은 다음과 같다. 점도는 유체 입자 사이의 마찰력, 즉 유체가 흐름에 저항하는 힘을 나타낸다. 일반적으로 현장에서는 Marsh Funnel 장비를 이용하여 1 L의 유체가 Cone을 통과하는 시간으로 점도(sec/lt)를 측정한다. 또한, Filter press 장비를 이용하여 슬러리의 상태에 따른 필터케이크 형성 능력과 그에 따른 필터케이크의 차수력을 평가할 수 있다. 슬러리가 100 psi 압력에서 7분 30초 동안 여과되는 수량(ml)과 챔버 하부에 생성된 필터 케이크의 두께(mm)를 측정한다.

유체의 항복점(Yield Point, lbs/100ft²)은 플라스틱 유체를 정지상태에서 유동상태로 변화시키는데 필요한 힘을 나타낸다. Viscometer를 사용하여 600 rpm과 300 rpm에서의 눈금을 읽어 소성 점도를 구한 후, 300 rpm에서의 눈금과 소성점도 차를 읽어 항복점을 계산할 수 있다. 또한, 겔강도(Gel strength, lbs/100ft²)는 정지 상태에서 입자 사이의 인력으로 프레임 구조를 생성할 수 있는 슬러리의 능력을 나타낸다. Shearometer를 이용하여 슬러리에 튜브가 가라앉는 눈금을 읽어 측정할 수 있다.

3. 실내시험을 통한 슬러리 해수 영향 분석

3.1 벤토나이트의 종류 및 특성

벤토나이트는 몬모릴로나이트가 주로 함유된 점토이며 나트륨(Sodium)계와 칼슘(Calcium)계 두 종류가 있다. 국내에서는 Ca-벤토나이트가 풍부하나 Na-벤토나이트가 팽창성이 강하고 액성한계가 높아 토목공사에 주로 쓰인다(Yoo et al., 2015).

벤토나이트가 물에 분산된 현탁액은 높은 점도를 나타내며, 물이나 기름과는 다르게 유동 속도가 변하면 현탁액의 점도도 함께 변하는 성질이 있다(낮은 유동속도에서는 높은 점도를 나타내며, 높은 유동 속도에서는 낮은 점도를 나타낸다). 이러한 성질을 틱소트로피(Thixotropy)이라고 하며 이를 활용해 시추 또는 지반 굴착 시에 슬러리가 주로 사용된다.

벤토나이트 입자의 팽창효과로 인해 외부작용 수압에 저항함으로써 수분의 침투성을 억제하는 성질이 있다(Kim et al., 2004). 지반 굴착 시 전면에 벤토나이트 현탁액이 일정한 압력으로 작용하면 불투수성의 막을 형성하여 지하수 유입을 방지하는 역할을 하게 된다. 이와 동시에 슬러리의 입자들이 지반의 공극을 충전하는 효과도 있으므로 굴착 벽면의 붕괴 방지에 크게 기여하게 된다(Shin et al., 1995). 또한 굴착 벽면에서는 슬러리의 유동 속도가 낮아지고 점도가 높아짐에 따라 굴착된 버력들을 지상까지 운반하는 것이 용이하게 된다.

그러나, 해수에 포함된 염분은 벤토나이트의 팽창률, 강도 등 주요 특성을 저해 시키는 문제가 있다(Park et al., 2012; Yukeselen-Aksoy et al., 2008; Arasan and Yetimoglu, 2008; Rao et al., 1993; Di Maio et al., 2004; Sridhanran et al., 2002; Park and Lee, 2012). Jeon et al. (2002)는 첨가제로 Polyvinyl Alcohol, Sodium Carboxymethyl Cellulose, Polyacrylic acid를 사용하여 증류수, 바닷물, 침출수, NaCl 용액에서의 자유 팽윤도를 검토한 바 있다. 이외에도 해수의 영향이 있는 슬러리에서 사용될 수 있는 첨가제로는 폴리머(유기폴리머), 점

도 증가제(카복시메틸셀룰로스), 염수안정제(세피오라이트, 크리소타일) 등이 있다. Jeong (2011)은 벤토나이트의 최대 자유팽창이 염분농도(0~30 g/L)에 따라 두 배 이상의 차이가 발생함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 벤토나이트 종류 및 해수의 비율에 따른 슬러리 상태의 변화 양상을 살펴 보았으며 실내시험을 통해 첨가제의 적정 투입량을 제시하였다.

3.2 벤토나이트의 종류에 따른 슬러리의 해수 영향 검토

벤토나이트의 종류에 따른 해수에서의 슬러리 상태 변화를 파악하기 위해 Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트가 해수 또는 담수에서 슬러리의 적절한 특성이 나타내는지 확인하였다. 각각의 배합수는 2L로 고정하였으며, 담수 100% 용액과 해수 50% 혼합 용액을 준비하였다. Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트를 담수 100%용액과 해수 50% 혼합 용액에 각각 100 g씩 투입하여 시료를 제작한 후 슬러리의 상태 변화를 검토하였다(Table 2).

이수식 TBM 현장에서는 송니량과 배니량을 측정할 수 있으며, 이를 활용하여 순환하고 있는 슬러리 순환량 대비 지하수(해수)의 유입량을 계산하기 용이하다. 따라서, 본 연구에서는 해수의 비율에 따른 슬러리의 상태변화를 검토하였으며 추후 염도를 기준으로 시험을 수행할 예정이다.

배합수에 벤토나이트를 투입 및 혼합하여 24시간 수화 후 시험을 수행하였으며 결과는 Table 3과 같다.

시료 1-1과 시료 1-3을 비교해보면, 해수에 의한 pH변화는 발생하지 않았으나 점도, 침투수량, 필터케이크, 항복점, 켈강도에서 상당한 차이를 나타내었다. 해수의 영향으로 인해 Marsh Funnel 점도에서 그 값이 46초에서 34초로 감소되었으며 항복점은 1 lbs/100ft²로 측정되었다. 또한 켈강도는 0 lbs/100ft²으로 측정되어 유체의 소성적 특성이 염분의 영향에 의해 소멸된 것으로 판단된다. 점도, 항복점 및 켈강도는 슬러리 관내 버력운송과 관련된

Table 2. Test specimens (according to bentonite type and sea water)

Sample No.	Water condition (ratio of sea water)	Bentonite
1-1	Water 2L (0%)	Na-Bentonite (100 g)
1-2	Water 2L (0%)	Ca- Bentonite (100 g)
1-3	Water 1L, Sea water 1L (50%)	Na- Bentonite (100 g)
1-4	Water 1L, Sea water 1L (50%)	Ca- Bentonite (100 g)

Table 3. Test result (according to bentonite type and sea water)

Items	Density (ton/m ³)	Marsh Funnel Viscosity (Sec/lit)	Water Loss (mm)	Filter Cake (mm)	Yield Point (lbs/100ft ²)	pH	Gel Strength (lbs/100ft ²)	
							10sec	10min
Sample 1-1	1.03	46	12	3	7	9	7.5	3.5
Sample 1-2	1.02	31	118	3	1	7.1	0	0
Sample 1-3	1.04	34	42	4	1	8.5	0	0
Sample 1-4	1.03	29	132	3	1	7.6	0	0

항목이므로 버력을 배출하는 능력이 저하될 것으로 판단된다. 이는 슬러리 이송관의 마모를 야기 시킬 수 있으며 챔버 하부에 쌓인 버력을 배출하지 못함에 따라 디스크 커터의 마모를 가중시킬 수 있다.

Fig. 2는 시험을 하기 위해 조성된 시료이며, Ca-벤토나이트는 해수(시료 1-4)뿐만 아니라 담수(시료 1-2)에서도 수화되지 못하고 응집되어 침전된 것을 확인할 수 있다. 담수에 Ca-벤토나이트를 혼합한 시료는 시간이 지남에 따라 현탁액과 같은 형상을 유지하였으나 Na-벤토나이트와 같은 점성을 발현하지는 못하는 것을 관측하였다.

또한 시료 1-2, 1-3, 1-4에서 측정된 침투수량이 시료 1-1보다 상당히 높은 것으로 보아 해당 시료의 필터케이크는 벤토나이트 입자가 팽창되지 않고 응집되어 여과지 위에 침전만 된 것으로 판단된다(Fig. 3).

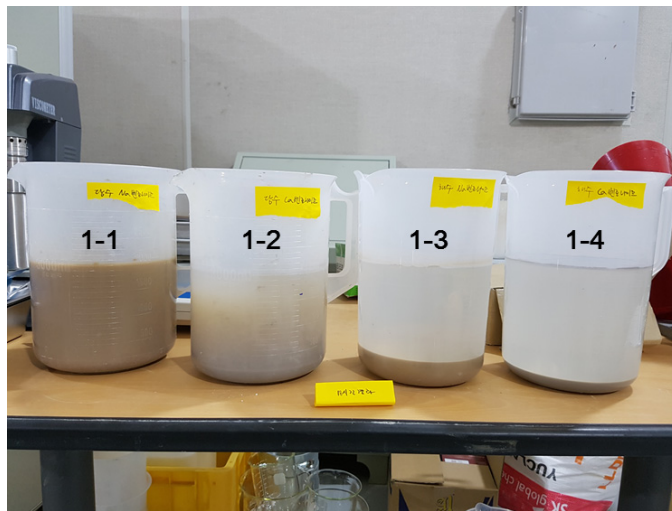


Fig. 2. Test specimens according to bentonite type and sea water

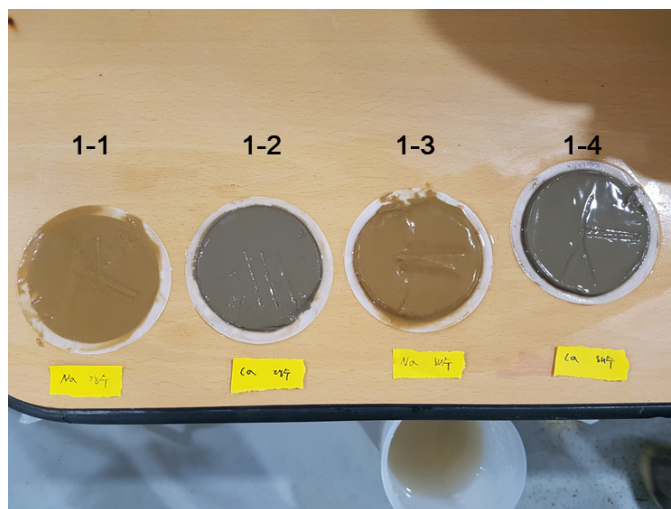


Fig. 3. Filter cakes of test results

본 시험에서는 벤토나이트의 종류에 관계없이 해수의 영향으로 인해 모든 관리 항목의 결과값이 기준에 미달 되었으며 특히, Ca-벤토나이트는 해수뿐만 아니라 담수에서도 기준을 만족하지 못하므로 TBM에 사용되는 재료로는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Na-벤토나이트를 활용하여 해수의 영향에 따른 슬러리의 상태 평가 시험을 수행하였다.

3.3 해수 비율에 따른 Na-벤토나이트 슬러리 상태변화 검토

해수의 비율에 따른 Na-벤토나이트 슬러리의 상태 변화를 검토하기 위하여 관련 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시료는 담수 및 해수, Na-벤토나이트를 사용하였으며 해수의 비율을 조절하여 준비하였다. 제작된 시료로 3~4회 반복 시험한 결과는 Table 4와 같으며, 본 시험을 통해 해수 비율 증가에 따른 슬러리의 변화 경향과 효율적인 슬러리 관리를 위한 해수의 허용 비율을 확인하였다.

시험결과, 슬러리에 해수의 비율이 늘어남에 따라 점도, 항복점, 쥘강도는 저하되며 침투수량은 상당히 증가되

Table 4. Test results according to sea water ratio

Items	Ratio of sea water (%)	Density (ton/m ³)	Marsh Funnel Viscosity (Sec/lit)	Water Loss (mm)	Filter Cake (mm)	Yield Point (lbs/100ft ²)	pH	Gel Strength (lbs/100ft ²)	
								10 sec	10 min
Sample 2-1	0	1.03	46	12	3	7	9.0	7.5	3.5
Sample 2-2	10	1.03	39.6	21	3	5	9.3	3.5	0
Sample 2-3	20	1.03	36.2	23	4	3	9.0	0	0
Sample 2-4	30	1.025	34	35	4	1	8.9	0	0
Sample 2-5	40	1.025	34	34	4	1	8.8	0	0
Sample 2-6	50	1.025	32	37	4	1	8.8	0	0

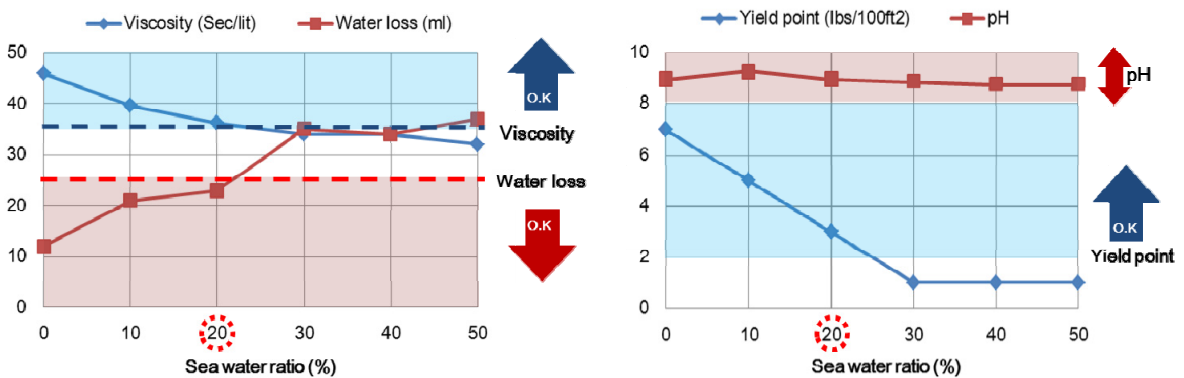


Fig. 4. Slurry condition changes according to sea water ratio

는 것을 확인할 수 있다. 특히 해수의 비율이 20% 이상이 되는 시점부터 슬러리의 관리 기준을 만족하지 못하는 것을 확인하였으며 이는 순환하고 있는 슬러리 중 해수의 비율이 슬러리의 상태를 유지 또는 관리하는 정량적인 기준이 될 수 있다고 판단된다.

3.4 해수의 비율에 따른 첨가제 투입량 결정

해수의 비율이 20% 이상일 경우, 벤토나이트를 추가로 첨가하는 방법뿐만 아니라 폴리머, 분산제, 염수 안정제와 같은 첨가제를 투입하여 슬러리를 관리하는 방법이 있다. 해수의 비율에 따른 첨가제의 적정 투입량을 결정하기 위하여 Table 5와 같이 이수식 TBM현장에서 사용되는 폴리머를 활용한 시험을 수행 하였다.

시험에 사용된 A 폴리머는 식물성 고분자 전해질로 슬러리의 점도 증가 및 안정제 역할을 하며 주로 해안지역의 공사에 사용되는 첨가제이고 B 폴리머는 셀룰로오스계 수용성고분자로 슬러리의 소성유동성과 켈강도를 증진시키는 역할을 한다.

해수의 비율은 30%, 50%, 70%로 적용하였으며, Fig. 5와 Fig. 6을 통해 이수식 TBM의 버력운송과 막장안정에 영향을 미치는 주요한 요소인 점도와 침투수량의 변화 양상을 나타내었다.

Table 6은 해수의 비율에 따라 각 첨가제의 적정 투입량을 정리하여 나타냈다. 순환하고 있는 슬러리의 양과 유입된 해수의 비율을 측정함으로써 첨가제의 투입량을 간편하게 결정할 수 있어 현장에서 슬러리를 적절하게 유지 및 관리하기에 용이할 것으로 판단된다.

Table 5. Additives for Slurry TBM

Item	Feature	Standard usage
A Polymer	Phytogenic high molecule electrolyte / Salt-resistant polymer	0.05~0.3%
B Polymer	Water-soluble polymer / Increase viscosity	0.5~1.0%

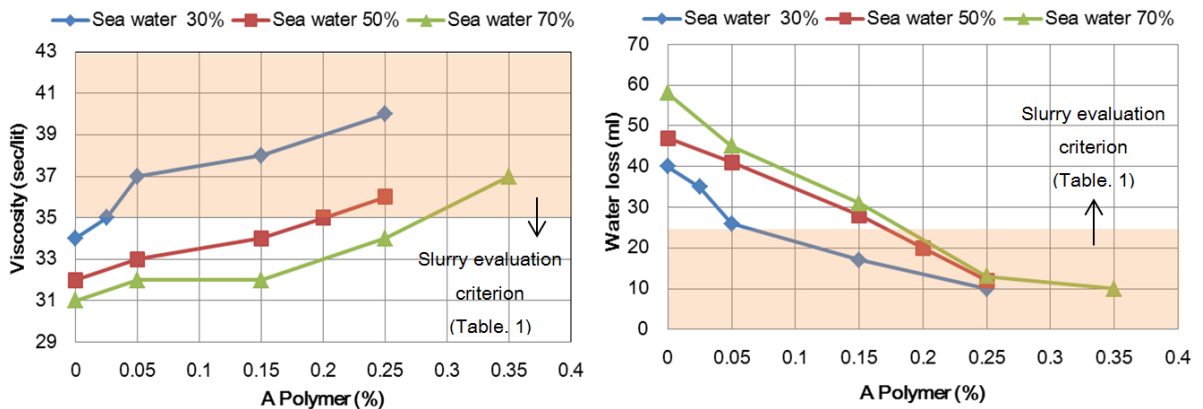


Fig. 5. Test result of A Polymer

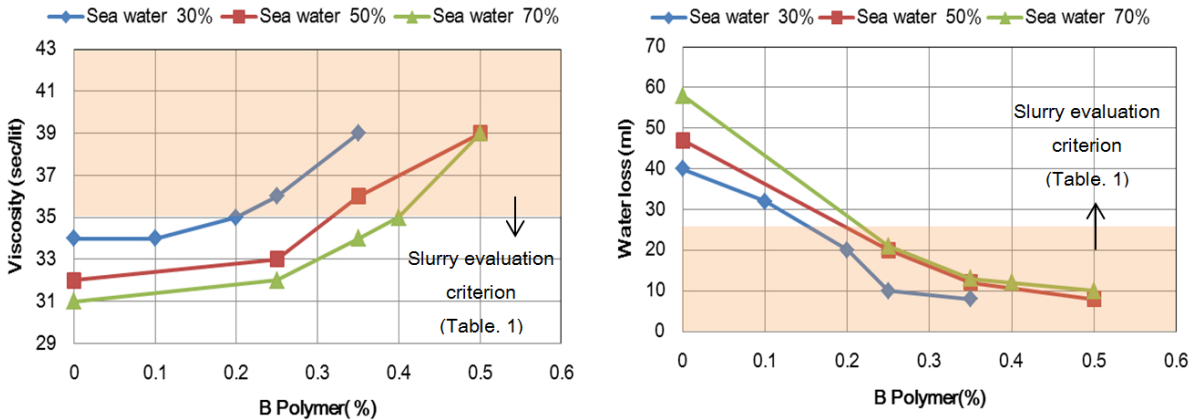


Fig. 6. Test result of B Polymer

Table 6. Proper amount of additives according to sea water ratio

Ratio of sea water (%)	30	50	70
A Polymer (%)	0.05	0.2	0.3
B Polymer (%)	0.2	0.3	0.4

해수환경에서의 TBM 터널현장에서는 1차적으로 해수의 유입을 차단하는 것이 최선의 방법이지만, 해수의 유입이 불가피한 상황에서는 해수의 비율을 주기적으로 점검하여 슬러리를 관리 해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 해저 TBM 터널에서 해수의 유입에 따른 슬러리의 관리방안을 검토하기 위하여 실내시험을 수행하였다. 이를 통해 슬러리에 포함된 해수의 비율만으로 상태를 확인할 수 있는 기준을 제시하였으며 해수의 비율에 따른 슬러리 관리 방안을 살펴 보았다. 또한 해수의 영향이 있는 현장에서 쉽게 사용할 수 있도록 슬러리에 포함된 염분농도에 따른 상태변화 시험을 수행하고 그 기준을 제시할 예정이다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 이수식 TBM 현장에서는 점도, pH 등 간단한 시험을 수행하여 슬러리의 기본적인 상태를 확인하고 있는 실정이다. 특히 슬러리는 해수의 영향으로 그 특성이 크게 변화되기 때문에 해수환경에서는 슬러리의 관리가 더욱 중요하다.
2. 실내시험을 수행해본 결과, 해수의 비율이 증가됨에 따라 점도, 항복점, 켈강도가 저하되고 침투수량이 상당히 증가된 것을 확인하였다. 이로부터, 이수식 TBM에서 순환하고 있는 슬러리는 해수의 영향으로 버력 배출능력 및 해수 유입 차단력이 저하 되는 것을 알 수 있다.
3. 해수의 비율에 따른 슬러리의 상태 변화 양상을 검토해본 결과, 해수의 비율이 20%를 초과하면 점도, 항복

점, 켈강도, 침투수량에서 그 기준을 만족하지 못하는 것을 확인하였다. 이로부터 현장에서 해수의 비율 또는 염분 측정만으로 슬러리의 상태를 유지 또는 관리하는 정량적인 기준이 될 수 있다.

4. 현장에서는 순환하는 슬러리의 해수 비율을 주기적으로 측정함으로써 필요시 벤토나이트 또는 첨가제를 투입하여 슬러리를 관리할 수 있다. 본 연구에서는 두가지 첨가제(A polymer, B polymer)를 사용하여 시험을 수행하다. 그 결과, 해수의 비율(30~70%)에 따라 각각 0.05~0.3%, 0.2~0.4%로 투입하면 슬러리의 관리기준을 만족하는 것을 확인하였다. 이에 따라, TBM 막장의 안정성을 확보하고 배니관의 마모를 줄여 공사비용 증가 및 다운타임 발생을 방지할 수 있어 TBM 굴착 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Jeon, H.Y., Park, Y.M., Mok, M.S. (2002), "Assessment of hydraulic properties of bentonite swelling agents by blending with additives", Journal of the Korean geosynthetios society, Vol. 1, No. 1, pp. 43-51.
2. Jeong, S.W. (2011), "The rheological characteristics of wyoming bentonite: role of salinity", Journal of the Korean geotechnical society, Vol. 27, No. 10, pp. 81-92.
3. Kim, Y.B., Kim, S.R., Kwak, K.S., Oh, S.G. (2004), "A study on development type bentonite mate waterproofing materials under the influence of salt water", The Korea Institute of Building Construction, Vol. 4, No. 2, pp. 45-49.
4. Oh, S.K., Yoo, J.K., Bae, K.S. (2002), "A study on the swelling property and watertightness evaluation of bentonite mat for waterproofing", Journal of the architectural institute of Korea structure & construction, Vol. 18, No. 4, pp. 91-96.
5. Park, S.S., Lee, J.W. (2012), "Effect of sea water on curing and strength of cemented sand", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 6, pp. 71-79.
6. Park, S.S., Nong, Z., Jeong, S.W. (2012), "Effect of sea water and microorganism on liquid and plastic limits of soils", Journal of the Korean geotechnical society, Vol. 28, No. 10, pp. 79-88.
7. Park, H.K., Oh, J.Y., Chang, S.B., Lee, S.B. (2016), "Case study of volume loss estimation during slurry tbn tunnelling in weathered zone of granite rock", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 1, pp. 61-74.
8. Roh, B.K., Koh, S.Y., Choo, S.Y. (2012), "Infiltration behaviour of the slurry into tunnel face during slurry shield tunnelling in sandy soil", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 3, pp. 261-275.
9. Shin, H.J., Kim, S.S., Kang, M.S., Han, S.J. (1995), "The influence of bentonite slurry on thixotropic

- properties”, *Journal of the Korean society of civil engineers*, Vol. 3, pp. 555-558.
10. Yoo, C.S., Choi, J.H., Han, Y.S. (2015), “Experimental study on the effect of drilling fluid with different mix design for bore hole collapse prevention”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol. 31, No. 1, pp. 15-24.
 11. You, K.H., Park, C.M. (2016), “A study on the risk and settlement evaluation of a shield TBM excavated in soft marine sedimentary soils”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 4, pp. 355-364.
 12. Arasan, S., Yetimoglu, T. (2008), “Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays”, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 32, pp.107-115.
 13. Di Maio, C., Santoli, L., Schiavone, P. (2004), “Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state”, *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 435-451.
 14. Rao, S.M., Sridharan, A., Chandrakaran, S. (1993), “Consistency limits behavior of bentonites exposed to seawater”, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 11, pp. 213-227.
 15. Sridharan, A. (1991), “Engineering behavior of fine-grained soils: a fundamental approach”, *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 1-136.
 16. Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Oren, A.H. (2008), “Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays”, *Engineering Geology*, Vol. 102, pp. 54-61.