

친환경 첨가제로서 잔탄검의 토압식 실드 TBM 쏘일 컨디셔닝 적용성 평가

이수형¹ · 최항석² · 권기범³ · 황병현^{3*}

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

Evaluation of applicability of xanthan gum as eco-friendly additive for EPB shield TBM soil conditioning

Suhyeong Lee¹ · Hangseok Choi² · Kibeom Kwon³ · Byeonghyun Hwang^{3*}

¹Master Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : Byeonghyun Hwang, bh2917@korea.ac.kr

Abstract

The Earth Pressure Balance (EPB) shield Tunnel Boring Machine (TBM) is widely used for underground tunnel construction for its advantages, such as eliminating the need for additional facilities compared to the slurry shield TBM, which requires Slurry Treatment Plant (STP). During EPB shield TBM excavation, a soil conditioning technique is employed to enhance the physical properties of the excavated soil by injecting additives, thus broadening the range of applicable ground conditions to EPB shield TBMs. This study explored the use of xanthan gum, a type of biopolymer, as an alternative to the commonly used polymer additive. Biopolymers, derived from biological sources, are fully biodegradable. In contrast to traditional polymers such as polyacrylic acid, which contain environmentally harmful components, xanthan gum is gaining attention as an eco-friendly material due to its minimal toxicity and environmental impact. Test conditions with similar workability were established through slump tests, and the rheological characteristics were assessed using a laboratory pressurized vane shear test apparatus. The experiments demonstrated that, despite exhibiting similar workability, the peak strength in the flow curve decreased with increasing the content of xanthan gum. Consequently, a correlation between the xanthan gum content and peak strength was established. Replacing the traditional polymers with xanthan gum could enable stable EPB shield TBM operation by reducing equipment load, in addition to offering environmental benefits.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(3)209-222(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.3.209>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received March 11, 2024

Revised May 13, 2024

Accepted May 14, 2024



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 © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: EPB shield TBM, Soil conditioning, Biopolymer, Xanthan gum, Rheological properties

초 록

토압식(Earth Pressure Balance) 쉴드 TBM (Tunnel Boring Machine)은 기계화 터널 굴착 공법 중 이수식(Slurry) 쉴드 TBM에 비하여 슬러리 처리 시설을 필요하지 않아 설비가 간단하고 진동과 소음이 적어 최근에 터널 시공에 널리 사용되고 있다. 토압식 쉴드 TBM으로 터널 굴착 시 첨가제를 활용하여 굴착토 물성을 개선하는 쏘일 컨디셔닝(soil conditioning) 기법을 적용하며, 이를 통해 토압식 쉴드 TBM을 적용할 수 있는 지반의 범위를 확장할 수 있다. 본 연구에서는 쏘일 컨디셔닝을 위한 첨가제로 주로 사용되는 폴리머를 대체할 수 있는 바이오폴리머(biopolymer)의 일종인 잔탄검(xanthan gum)의 적용성을 검토하였다. 바이오폴리머란 생물학적 기원으로 생성된 폴리머로서 모두 생분해가 가능하다. 환경에 유해한 성분을 함유하고 있는 일반 폴리머(폴리아크릴산계 폴리머)와 달리 잔탄검은 유독성이 거의 없고 환경에 미치는 영향이 적어 친환경 소재로 각광받고 있다. 슬럼프 시험을 통해 유사한 워커빌리티(workability)를 보이는 시험조건을 선정하고, 실내 가압 베인전단 시험을 통해 유동학적(rheological) 특성을 평가하였다. 유사한 슬럼프 값을 보이더라도 잔탄검의 함유량이 증가할수록 유동곡선(flow curve)상에 첨두강도가 감소하는 경향이 나타났으며, 이를 통해 잔탄검 함량과 첨두강도 사이의 상관관계를 도출하였다. 일반 폴리머를 잔탄검으로 대체한다면 환경친화적이라는 장점과 더불어 장비 부하를 감소시켜 안정적인 TBM 운용이 가능할 것이다.

주요어: 토압식 쉴드 TBM, 쏘일 컨디셔닝, 바이오폴리머, 잔탄검, 유동학적 특성

1. 서론

토압식(Earth Pressure Balance) 쉴드 TBM (Tunnel Boring Machine)으로 터널 굴착 시 막장에 첨가제를 주입하는 쏘일 컨디셔닝(soil conditioning) 기법을 통해 굴착토의 소성 유동화를 유도하여 해당 장비를 적용할 수 있는 지반의 범위를 확장할 수 있다(Merritt et al., 2003). 또한 쏘일 컨디셔닝을 통해 막장압을 유지하고, 굴착토의 전단강도와 투수계수 감소 및 커터 마모량 감소, 그리고 스크류 컨베이어 내 연속적인 배토와 워커빌리티 향상 등 다양한 효과를 기대할 수 있다(Quebaud et al., 1998; Jancsecz et al., 1999; Peila et al., 2007; Zhou and Yang, 2020; Avunduk et al., 2021). 토압식 쉴드 TBM에서 첨가제로 컨디셔닝된 굴착토의 거동을 이해하는 것은 매우 중요하며, 이는 굴착토의 유동학적 특성을 파악함으로써 이루어질 수 있다(Hu and Rostami, 2020). 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성을 파악하는 유용한 방법 중에 하나로 콘크리트의 워커빌리티를 평가하는 슬럼프 시험을 활용할 수 있다(Langmaack, 2000). 그러나 슬럼프 시험은 실험자의 숙련도와 시험환경에 의한 오차 발생 가능성이 높다(Kwak et al., 2022). 이러한 단점을 보완하기 위해 국외에서는 유동계(Rheometer)를 통해 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성을 정량적으로 평가하고 있다(Karmakar and Kushwaha, 2007; Zumsteg et al., 2009; Messerklinger et al., 2011; Galli and Thewes, 2019).

쏘일 컨디셔닝에 주로 활용되는 첨가제는 폼(foam)과 폴리머(polymer)가 있다. EFNARC (2005)는 기계화 터

널공법에 있어 첨가제의 적용에 대한 가이드라인을 제시하여 이를 표준으로 많은 연구가 수행되었다. 그러나 친환경 재료로서 바이오폐리머(biopolymer)는 일반 폴리머와 같이 흙의 점착력을 증대시키고 물을 흡수하여 흙 입자 사이의 공극 내에 보존하는 역할을 하나 쓰일 컨디셔닝을 위한 첨가제로써 적용된 사례는 전무하다. 바이오폐리머는 동물, 식물, 미생물과 같은 다양한 생물학적 공급원에 의해 생산되는 고분자물질로, 알긴산(alginic acid), 젤란검(gellan gum), 구아검(guar gum), 키토산(chitosan), 잔탄검(xanthan gum) 등 여러 종류가 있으며 생물학적으로 분해가 가능한 폴리머를 총칭한다. 대부분의 바이오폐리머는 인체에 무해하며 생산과정에서 유기물질(biomass)을 원료로 사용함에 따라 탄소배출이 거의 없다. 또한 분해 및 재생 과정에서 미생물에 의해 완전 분해되어 지속가능한 미래산업의 재료로서 적합하다(Choi, 2012). 환경 친화적인 장점에 더해 지반의 강도를 증진시키며 투수계수 저감 효과로 지반공학 분야에서도 바이오폐리머를 활용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Wiszniowski and Cabalar, 2014; Chang et al., 2016; Kwon et al., 2020).

본 논문에서는 첨가제로써 바이오폐리머를 적용하여 일반 폴리머를 대체 가능한지를 검토하기 위해 슬럼프 시험 및 실내 가압 베인전단 시험을 수행하였다. 슬럼프 시험을 통해 워커빌리티를 평가하고 유사한 슬럼프 값을 갖는 시험 조건을 선정하였다. 이후 실내 가압 베인전단 시험을 통해 일반 폴리머와 잔탄검으로 컨디셔닝된 흙의 유동학적 특성을 비교하였다.

2. 첨가제의 종류 및 특성

2.1 폼과 폴리머

일반적으로 토압식 쉴드 TBM으로 터널 굴착 시 굴착토의 물성을 개선하여 굴진 효율 및 안정성을 향상시키기 위해 첨가제를 주입하는 쓰일 컨디셔닝을 수행한다. 본 연구에서는 첨가제로 폼과 폴리머, 바이오폐리머의 일종인 잔탄검을 활용하여 쓰일 컨디셔닝을 수행하였다.

폼은 가장 경제적인 첨가제이며 물, 공기, 폼 원액(foaming agent)으로 구성되어 있다. 물과 폼 원액을 목표 농도에 맞게 희석하여 폼 용액을 만들고, 기포 발생장치를 통해 용액과 공기를 분사하여 팽창시킨다. 굴착토에 폼 주입 시, 소성 유동성 및 지수성 확보가 가능하며, 흙 입자 사이의 공극을 기포가 채우게 되어 투수계수를 감소시킨다(Oh, 2021). 적절한 폼의 적용은 TBM 장비 부하를 감소시키고 굴진면 안정화에 기여하여 시공에 중요한 역할을 한다. 첨가제로써 폼 적용 시, 폼 농축계수(Concentration of Foam, C_f), 폼 팽창비(Foam Expansion Ratio, FER), 폼 주입비(Foam Injection Ratio, FIR)와 같이 3가지 주입변수를 고려해야 하며, 식 (1)~식 (3)과 같다.

$$C_f = \frac{V_t}{V_t + V_w} \times 100 (\%) = \frac{V_t}{V_{lf}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$FER = \frac{V_f}{V_{lf}} = \frac{V_{lf} + V_a}{V_{lf}} \quad (2)$$

$$FIR = \frac{V_f}{V_{es}} \times 100 (\%) = \frac{V_{lf} + V_a}{V_{es}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서, V_t 는 폼 원액의 부피(m^3), V_w 는 물의 부피(m^3), V_{lf} 는 폼 수용액의 부피(m^3), V_f 는 팽창된 폼의 부피(m^3), V_a 는 공기의 부피(m^3), V_{es} 는 굴착토의 부피(m^3)를 나타낸다.

폴리머는 물, 폴리머 원액으로 구성되어 있다. 폴리머 원액은 수용성 고분자 물질로 이루어져 있어, 소량으로도 점성 확보가 가능하다(Hwang et al., 2023). 이러한 특성으로 인해 토압식 쉴드 TBM 챔버 내 균등한 토압 유지를 가능하게 하여 막장 붕괴를 방지할 수 있다. 또한 윤활 작용을 통해 TBM 커터 또는 챔버에 굴착토가 부착되는 현상을 방지하여 장비의 부하를 줄일 수 있다. 첨가제로써 폴리머는 폼과 다르게 특별한 팽창 장치가 필요하지 않다. 첨가제로 적용 시 폴리머 농축계수(Concentration of Polymer, C_p), 폴리머 주입비(Polymer Injection Ratio, PIR)와 같이 2가지 주입 변수를 고려해야 하며, 다음과 같이 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$C_p = \frac{V_p}{V_p + V_w} \times 100 (\%) = \frac{V_p}{V_{lp}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$$PIR = \frac{V_{lp}}{V_{es}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서, V_p 는 폴리머 원액의 부피(m^3), V_{lp} 는 폴리머 수용액 부피(m^3)를 나타낸다.

2.2 잔탄검

잔탄검은 그람음성(Gram-negative)의 호기성 토양 미생물인 잔토모나스 캄페스트리스(*Xanthomonas campestris*)균에 탄수화물을 주입해 발효시켜 얻은 고분자 다당류를 회수·정제하는 과정을 통해 생산된 세포 외 다당류로, β -1, 4-포도당을 주골격으로 하며 만노스(mannose) 및 글루크론산(glucuronic acid)의 나트륨, 칼륨 및 칼슘염 등으로 구성된 혼합물이다(Jansson et al., 1975; Melton et al., 1976). 잔탄검은 넓은 pH와 온도 범위에서 안정적이며, 물에 잘 용해된다(Sworn, 2021). 또한 소량으로도 높은 점성 발현이 가능하고 유사 가소성(pseudoplasticity)을 띠며, 사질토에 주입 시 유기막 형성을 통해 흙 입자 사이의 접촉면을 늘리고 연결다리를 형성하여 결합력을 증진시킨다(Chang et al., 2015).

2.3 폴리아크릴산계 폴리머와 잔탄검의 비교

쏘일 컨디셔닝에 주로 사용되는 폴리머는 폴리 아크릴산(polyacrylic acid polymer, PAA)계 폴리머로, 단위체(monomer)가 이중결합을 통해 긴 사슬로 연결된 자유 라디칼 중합(free radical polymerization) 매커니즘에 의해 생성된다(Elliott et al., 2004). 폴리머와 잔탄검 모두 흙 입자 표면에 부착되어 증점 효과가 뛰어나고 물을 흡수하여 공극 내에 보존하는 능력을 가지고 있다(Khemakhem et al., 2019; Li et al., 2022). 폴리머와 잔탄검의 화학 구조 비교는 Fig. 1과 같다(Petri, 2015; Jung, 2018).

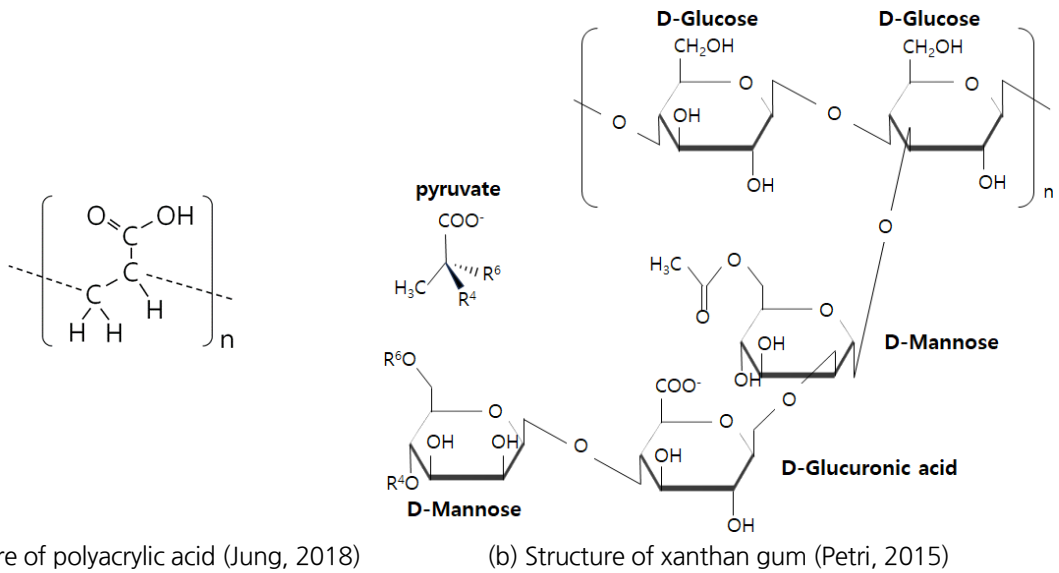


Fig. 1. Comparison of chemical composition structure between PAA polymer and xanthan gum

3. 유동학적 특성 평가

3.1 유동학적 특성

쏘일 컨디셔닝의 주목적은 고체상태의 굴착토를 고체와 액체 중간 형태의 물질로 변화시키는 소성 유동화(plastic fluidization)이다. 이러한 물질의 상태를 설명하는 것이 유동학(rheology)이며 TBM의 안정적이고 효율적인 운영을 위해 유동학적 특성을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 굴착토의 유동학적 특성으로 워커빌리티에 더하여 전단특성, 걸보기 점도, 텍소트로피 면적(thixotropic area)을 파악하고자 한다.

컨디셔닝된 굴착토의 거동은 워커빌리티를 통해 평가하며, 이는 슬럼프 시험을 통해 가장 효율적으로 평가할 수 있다. EFNARC (2005)는 토압식 쉴드 TBM의 최적 굴진을 위한 슬럼프 값은 10~20 cm 범위가 가장 적합한 것으로 제시하였다. 슬럼프 시험방법과 분석은 ASTM C143 (2017)에 따른다.

전단속도에 따른 전단응력을 측정하여 산출된 유동곡선(flow curve)을 통해 전단특성을 평가할 수 있다. 베인 전단 시험을 통해 실시간 토크 데이터 도출이 가능하며, 첨두강도(peak strength)와 항복응력(yield stress)을 산정할 수 있다. 여기서 베인은 상, 하부 경계면이 없는 원통형으로 회전하고(Meng et al., 2011), 시험 종료 후 시료의 파괴면은 베인의 직경, 높이와 동일한 원통형이며 파괴면에 가해지는 전단응력이 균일하다고 가정한다(Karmakar and Kushwaha, 2007). 베인전단 시험에서 도출되는 전단응력과 전단속도는 각각 식 (6), 식 (7)로 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{2 T_m}{\pi D_v^3 \left(\frac{H_v}{D_v} + \frac{1}{3} \right)} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4\pi D_v^2}{60(D_c^2 - D_v^2)} \omega_{vane} \quad (7)$$

여기서, τ 는 전단응력(Pa), T_m 은 측정된 토크값(N·m), D_v 은 베인 직경(m), H_v 는 베인 높이(m)를 의미하고, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(1/s), D_c 는 챔버의 내경(m), ω_{vane} 은 베인의 회전속도(RPM)를 나타낸다.

첨가제를 통해 컨디셔닝된 굴착토는 비뉴턴 유체 특성을 보여준다(Lee et al., 2022). 비뉴턴 유체는 전단응력과 전단속도가 비선형 관계를 갖는다. 컨디셔닝된 시료를 비뉴턴 유체 거동 모델인 빙햄 소성 모델(Bingham Plastic Model)로 가정하여 겔보기 점도를 산정하였으며, 다음 식 (8)과 같이 시료에 가해진 전단응력과 전단속도 관계로부터 구할 수 있다(Lee et al., 2022).

$$\begin{cases} \tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} (|\tau| > \tau_y) \\ \dot{\gamma} = 0 (|\tau| \leq \tau_y) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, τ_y 는 항복응력(Pa), μ 는 겔보기 점도(Pa·s), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(1/s)를 나타낸다.

교란된 흙이 시간이 지남에 따라 흙 입자 사이에 점차 결합력이 생기게 되어 강도를 회복하는 현상을 틱소트로피(thixotropy) 현상이라 한다. 유동곡선은 전단속도가 증가하는 구간과 감소하는 구간에서 각각 상향곡선, 하향곡선으로 도출된다. 이때 곡선들은 하나의 단면을 형성하며, 형성된 단면의 면적을 틱소트로피 면적이라고 한다.

3.2 실내 가압 베인전단 시험 장비

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 Lee (2021)가 개발한 실내 가압 베인전단 시험장비를 사용하였다. ASTM D4648 (2016)에 따라 직경과 높이의 비가 1:2이고 4개의 블레이드가 장착된 십자(十字)형 베인을 적용하였고, 베인을

회전시켜 전단속도에 따른 전단응력을 통한 유동곡선을 산출할 수 있다. 상부 덮개를 상하로 조절하여 챔버 내에 압력을 가할 수 있도록 제작되었으며, 2개의 압력센서와 1개의 토크센서를 통해 챔버 내 압력과 토크 데이터를 실시간으로 확인할 수 있다. 또한 ASTM D4648 (2016)에 따라 시료의 전단파괴가 2~3분 사이에 이루어지도록 베인의 회전속도를 구성하였다. 총 시험시간은 7분 30초이며 30초 간격의 15단계로 진행된다. 단계당 회전 속도는 1/60, 1/30, 1/15, 1/10, 1/5, 1/3, 1/2, 3/4 RPM이며, 3/4 RPM 이후에는 역순으로 시험을 진행한다.

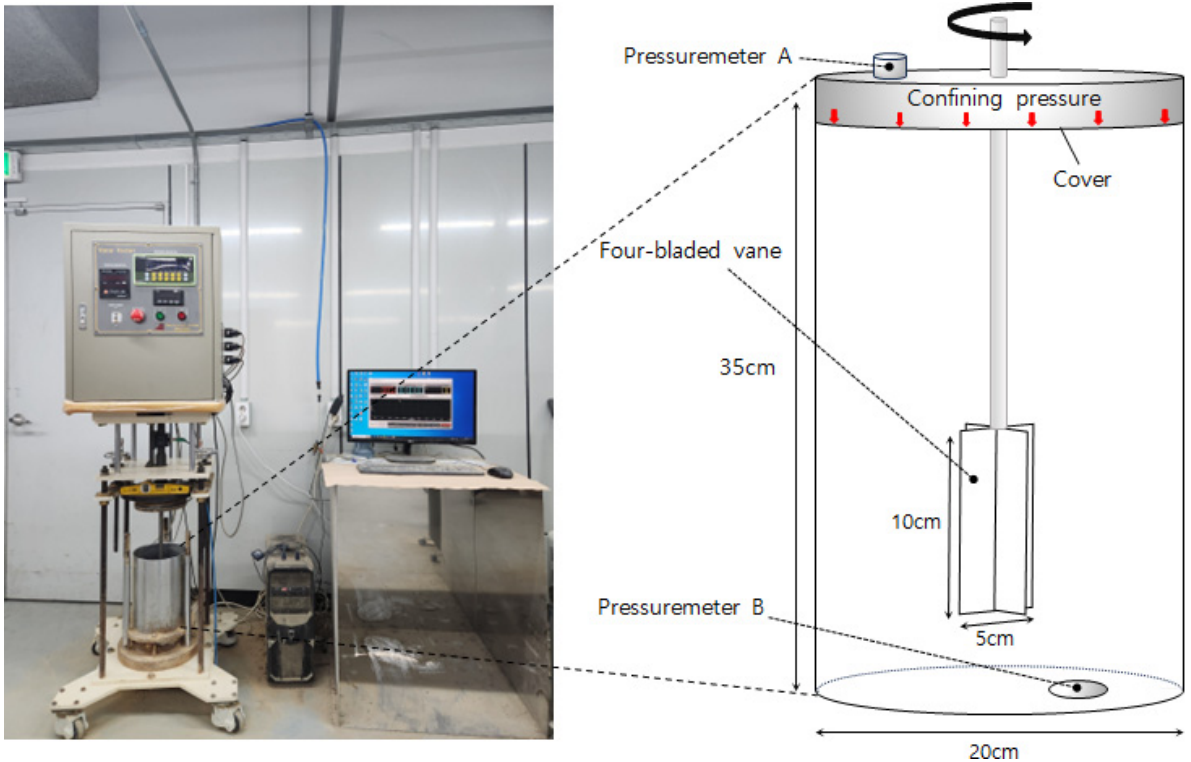


Fig. 2. The front view of laboratory pressurized vane shear test apparatus and chamber details

4. 실내 가압 베인전단 시험을 통한 유동학적 특성 분석

4.1 시료 조성 및 슬럼프 시험을 통한 시험 조건 선정

본 연구에서는 인조 규사 70%와 일라이트 30%를 혼합하여 Fig. 3에 제시된 입도곡선을 갖는 인공 사질토로 시료를 조성하여 첨가제 조건에 따른 슬럼프 시험과 실내 가압 베인전단 시험을 수행하였다. 조성한 시료는 Maidl (1995)이 제안한 토압식 쉴드 TBM 적용이 가능한 입도 범위 내에 속하며, 자세한 특성은 Table 1과 같다(Lee, 2021).

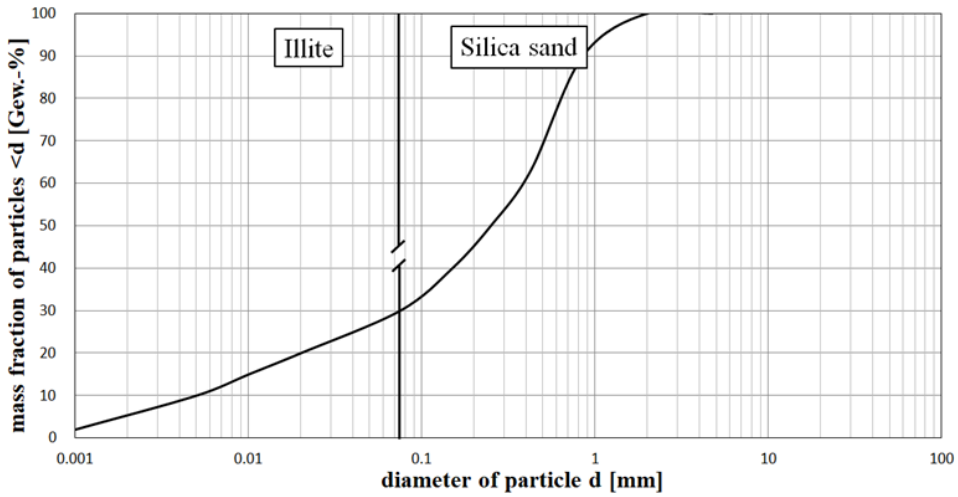


Fig. 3. Grain-size distribution curve

Table 1. Properties of soil specimen

Soil specimen	USCS	Specific gravity	Unit weight (t/m^3)
Artificial sandy soil	SM	2.68	1.8

쏘일 컨디셔닝을 수행하기 위해 첨가제로 폼, 폴리머와 잔탄검을 사용했으며, 각 첨가제의 특징은 Table 2와 같다(Lee et al., 2022; Sulaiman et al., 2022). 폼 발생장치의 가동 패널을 통해 폼 수용액과 공기의 적용량을 실시간으로 확인할 수 있어, 목표한 폼 팽창비(FER)의 확인이 가능하다. 폴리머는 목표한 조건에 맞춰 물과 폴리머 원액을 유리막대로 교반 후 적용하였으며, 잔탄검이 추가되는 조건의 경우 분말 형태의 잔탄검을 폴리머 용액에 첨가하여 분말이 모두 녹을 때까지 교반 하였다. 첨가제와 시료 혼합 시 핸드 믹서를 활용하여 2분간 균일한 속도로 교반 하였다.

Table 2. Properties of additives

Additives	Apparent color	Specific gravity	pH
Foam	Bright brown	1.00~1.10	8.0~11.0
Polyacrylic acid	Milk-white	1.00~1.10	7.0~9.0
Xanthan gum	Light yellow	-	6.5

폼의 최적 주입변수로 EFNARC (2005)는 0.5~5%의 폼 농축계수(C_f), 5~30의 폼 팽창비(FER), 30~60%의 폼 주입비(FIR) 범위를 제시한 바 있으며, 최적의 워커빌리티를 나타내는 지표로 10~20 cm의 슬럼프 값의 범위를 제안하였다. 이를 고려하여, 실내 가압 베인전단 시험을 수행하기 앞서 슬럼프 시험을 통해 최적의 워커빌리티를

보이고 유사한 슬럼프 값을 갖도록 Table 3과 같이 시험 조건을 선정하였으며, 구체적인 절차는 다음과 같다(Lee et al., 2019).

- 함수비 18%, 폼 농축계수 3%, 폼 팽창비 15, 폼 주입비 50%로 고정한 후 10~20 cm의 슬럼프 값을 갖는 폴리머 첨가 조건을 기본 조건(Case 1)으로 선정한다.
- 기본 조건을 기준으로 폴리머 주입비는 고정하고, 폴리머 대신 기본 조건과 유사한 슬럼프 값을 보이기 위해 필요한 잔탄검의 함량을 시행착오법으로 파악한다.
- 잔탄검과 폴리머의 증감량을 세분화하여 위의 관계가 동일하게 적용되는지 확인하고 시험 조건으로 선정한다.

Table 3. Case selection based on slump value

Case No.	W (%)	FER	C _f (%)	FIR (%)	PIR (%)	Polymer (g/10kg of soil)	Xanthan (g/10kg of soil)	Slump (cm)
1	18	15	3	50	5	1.0	0	14.7
2						0.8	0.27	14.0
3						0.6	0.53	13.9
4						0.4	0.8	13.9
5						0.2	1.06	14.5
6						0	1.33	15.5

슬럼프 시험에서 시료 10 kg당 폴리머 주입량이 0.2 g 간격으로 줄어들 때 잔탄검 주입량이 약 0.27 g 간격으로 증가하면 13.9~15.5 cm의 유사한 슬럼프 값 범위를 나타냈다. 구성된 인공 사질토 조건에서 컨디셔닝된 시료의 유사한 워커빌리티 조성을 위해 잔탄검은 폴리머보다 약 1.33배 함량이 필요한 것을 확인하였다.

4.2 실내 가압 베인전단 시험결과 분석

설계한 시험조건에 대한 유동학적 특성을 평가하기 위해 실내 가압 베인전단 시험을 수행하였다. 모든 시험조건에서 단위중량이 약 1.8 t/m³이고 정지토압계수가 0.5인 사질토 지반의 심도 20 m에서의 정지수평토압을 모사하기 위해 구속압력을 200 kPa로 적용하여 시험을 수행하였다. 각 시험 조건에 따른 토크 데이터는 Fig. 4와 같다. 토크 데이터에서는 항복응력은 뚜렷한 경향성 없이 유사한 값을 보이나, Fig. 5(a)의 flow curve를 통해 잔탄검의 함량이 커질수록 첨두강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

도출한 토크 데이터를 통해 Fig. 5와 같이 유동학적 특성을 평가하였다. 잔탄검의 함량이 증가할수록 겔보기 점도와 틱소트로피 면적 모두 감소하였다. 또한 Fig. 6과 같이 잔탄검 함량과 첨두강도 사이에 선형 반비례 관계를 보이고, 유사한 슬럼프 값을 갖더라도 일반 폴리머를 잔탄검으로 대체 시 첨두강도를 낮출 수 있어 장비 부하 저감 효과가 있음을 확인하였다.

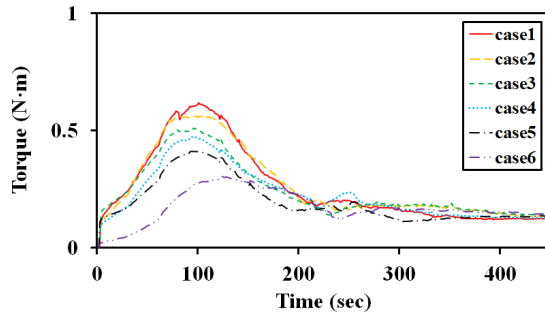


Fig. 4. Torque results according to the combination of xanthan gum and polymer

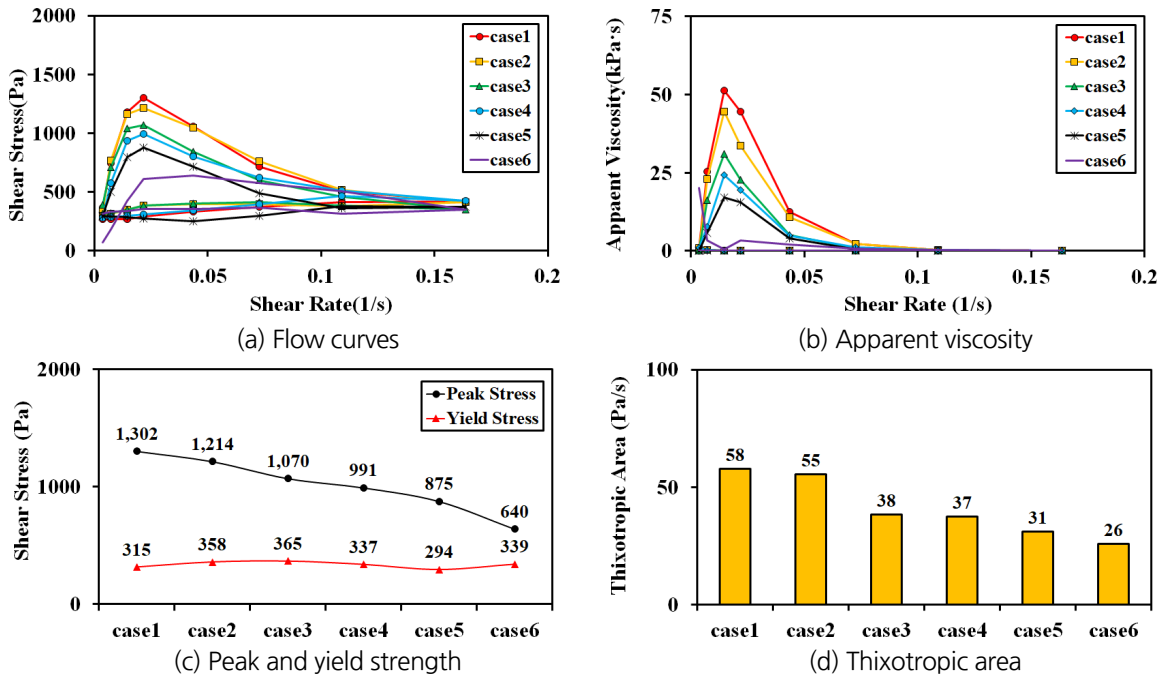


Fig. 5. Rheological properties according to the content of xanthan gum and polymer

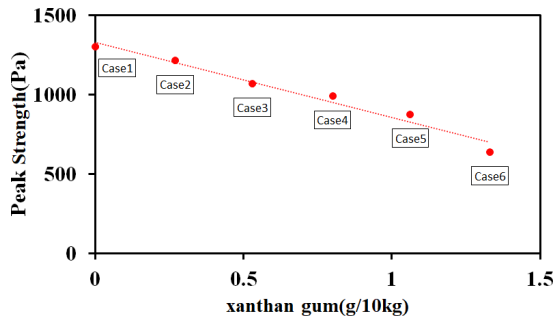


Fig. 6. Relationship of xanthan gum and peak strength

5. 결론

본 논문에서는 컨디셔닝된 인공 사질토를 대상으로 슬럼프 시험 및 실내 가압 베인전단 시험을 통해 일반 폴리머를 대체하여 친환경 잔탄검의 토압식(EPB) 쉴드 TBM 첨가제로서 적용 가능성 검토를 위한 기초연구를 수행하였다. 동일한 함수비와 폼 주입변수를 갖는 시료에 대해 10~20 cm의 슬럼프 값을 보이도록 폴리머 주입변수를 설정하였다. 이와 유사한 슬럼프 값을 갖도록 폴리머와 잔탄검 함량을 변화시키며 시험 조건을 선정하였다. 유사한 슬럼프 값을 갖는 시험조건에 대하여 심도 약 20 m의 구속압력을 모사하기 위해 챔버 내압을 200 kPa로 적용하여 실내 가압 베인전단 시험을 수행하였다. 토크 데이터를 기반으로 유동학적 특성인 침투강도 및 항복응력, 걸보기 점도, 텍스트로피 면적을 도출하였으며 본 연구의 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 규사 70%, 일라이트 30%로 조성된 인공 사질토를 대상으로 최적의 워커빌리티를 나타내는 10~20 cm의 슬럼프 값을 갖도록 기본 시험조건(Case 1)을 선정하였다. 이를 기반으로 일반 폴리머를 친환경 잔탄검으로 대체 시 유사한 슬럼프 값을 보이기 위해 약 1:1.33 비율(일반 폴리머:잔탄검)이 필요한 것을 확인하였다.
2. 슬럼프 시험과 동일한 시료 조건을 대상으로 실내 가압 베인전단 시험을 수행하여 유동학적 특성을 평가하였다. 각 시험 조건에 있어 항복응력은 330 kPa를 기준으로 편차범위 35 kPa 내로 유사한 결과가 나타났다. 잔탄검의 함량이 증가할수록 침투강도를 비롯한 걸보기 점도와 텍스트로피 면적 모두 감소하는 경향이 나타났으며, 잔탄검 함량과 침투강도에는 선형 반비례 관계가 있음을 확인하였다.
3. 잔탄검은 친환경 첨가제로서 현재 일반적으로 토압식 쉴드 TBM의 컨디셔닝에 적용하는 폴리머보다 환경적 측면에서 유리하며, 유사한 워커빌리티 조건임에도 침투강도를 경감시키므로 일반 폴리머보다 커터 토크 및 마모 감소 등 장비 부하 저감에 효과적이다. 향후 각 첨가제의 화학적 결합 특성을 비교하고 다양한 지반 및 바이오폴리머에 대한 적용성을 추가 검토한다면 친환경 토압식 쉴드 TBM 터널 시공을 가능하게 하는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(RS-2022-00144188) 및 협력거점형 국토교통국제협력 연구개발사업(RS-2024-00410248)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

저자 기여도

이수형은 실험 수행 및 원고 작성, 최항석은 연구 개념 및 설계를, 권기범은 데이터 수집, 황병현은 데이터 분석 및 원고 검토를 하였다.

References

1. ASTM C143 (2017), Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, ASTM International, Vol. 04.02, pp. 1-4.
2. ASTM D4648 (2016), Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine grained clayey soil, ASTM International, Vol. 04.08, pp. 1-7.
3. Avunduk, E., Copur, H., Tolouei, S., Tumac, D., Balci, C., Bilgin, N., Shaterpour-Mamaghani, A. (2021), "Possibility of using torvane shear testing device for soil conditioning optimization", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 107, 103665.
4. Chang, I., Im, J., Cho, G.C. (2016), "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering", *Sustainability*, Vol. 8, No. 3, 251.
5. Chang, I., Im, J., Prasadhi, A.K., Cho, G.C. (2015), "Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening", *Construction and Building Materials*, Vol. 74, pp. 65-72.
6. Choi, J.Y. (2012), "A study on biopolymer as a future fiber material", *Journal of the Korean Society of Design Culture*, Vol. 18, No. 1, pp. 481-493.
7. EFNARC (2005), Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock, European Federation of National Associations Representing for Concrete, pp. 1-45.
8. Elliott, J.E., Macdonald, M., Nie, J., Bowman, C.N. (2004), "Structure and swelling of poly (acrylic acid) hydrogels: effect of pH, ionic strength, and dilution on the crosslinked polymer structure", *Polymer*, Vol. 45, No. 5, pp. 1503-1510.
9. Galli, M., Thewes, M. (2019), "Rheological characterisation of foam-conditioned sands in EPB tunnelling", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, pp. 145-160.
10. Hu, W., Rostami, J. (2020), "A new method to quantify rheology of conditioned soil for application in EPB TBM tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 96, 103192.
11. Hwang, B., Kang, M., Kwon, K., Yang, J., Choi, H. (2023), "Evaluating rheological properties of excavated soil for EPB shield TBM with foam and polymer", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 25, No. 5, pp. 387-401.
12. Jancsecz, S., Krause, R., Langmaack, L. (1999), "Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir", *Challenges for the 21st Century: Proceedings of the World Tunnel Congress*, Oslo, pp. 865-875.
13. Jansson, P.E., Kenne, L., Lindberg, B. (1975), "Structure of the extracellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris*", *Carbohydrate research*, Vol. 45, No. 1, pp. 275-282.
14. Jung, J. (2018), "Soil-water characteristic curve of sandy soils containing biopolymer solution", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 19, No. 10, pp. 21-26.
15. Karmakar, S., Kushwaha, R.L. (2007), "Development and laboratory evaluation of a rheometer for soil visco-plastic parameters", *Journal of Terramechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 197-204.
16. Khemakhem, M., Attia, H., Ayadi, M.A. (2019), "The effect of pH, sucrose, salt and hydrocolloid gums

- on the gelling properties and water holding capacity of egg white gel”, *Food Hydrocolloids*, Vol. 87, pp. 11-19.
17. Kwak, J., Lee, H., Hwang, B., Choi, J., Choi, H. (2022), “A laboratory pressurized vane test for evaluating rheological properties of excavated soil for EPB shield TBM: test apparatus and applicability”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 5, pp. 355-374.
 18. Kwon, Y.M., Ham, S.M., Kwon, T.H., Cho, G.C., Chang, I. (2020), “Surface-erosion behaviour of bio-polymer-treated soils assessed by EFA”, *Géotechnique Letters*, Vol. 10, No. 2, pp. 106-112.
 19. Langmaack, L. (2000), “Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling”, *Proceedings of the North American Tunneling*, Vol. 2000, Boston, pp. 525-542.
 20. Lee, H. (2021), Evaluation on performance of EPB shield tunnelling with foam conditioning, Ph.D. Thesis, Korea University, pp. 1-272.
 21. Lee, H., Kwak, J., Choi, J., Hwang, B., Choi, H. (2022), “A lab-scale experimental approach to evaluate rheological properties of foam-conditioned soil for EPB shield tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 128, 104667.
 22. Lee, H., Shin, D., Kim, D.Y., Shin, Y.J., Choi, H. (2019), “Study on EPB TBM performance by conducting lab-scaled excavation tests with different foam injection for artificial sand”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 4, pp. 545-560.
 23. Li, S., Wan, Z., Zhao, S., Ma, P., Wang, M., Xiong, B. (2022), “Soil conditioning tests on sandy soil for earth pressure balance shield tunneling and field applications”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 120, 104271.
 24. Maidl, U. (1995), Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch bodenkonditionierung mit Schaum, Ph.D. Thesis, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, pp. 1-184.
 25. Melton, L.D., Mindt, L., Rees, D.A. (1976), “Covalent structure of the extracellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris*: evidence from partial hydrolysis studies”, *Carbohydrate research*, Vol. 46, No. 2, pp. 245-257.
 26. Meng, Q., Qu, F., Li, S. (2011), “Experimental investigation on viscoplastic parameters of conditioned sands in earth pressure balance shield tunneling”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 9, pp. 2259-2266.
 27. Merritt, A.S., Borghi, F.X., Mair, R.J. (2003), “Conditioning of clay soils for earth pressure balance tunnelling machines”, *Proceedings of the Underground Construction 2003*, London, pp. 455-466.
 28. Messerklinger, S., Zumsteg, R., Puzrin, A. (2011), “A new pressurized vane shear apparatus”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 112-121.
 29. Oh, J. (2021), Laboratory study on optimum foam injection condition for EPB shield TBM in weathered granite soil, Master Thesis, Korea University, pp. 1-96.
 30. Peila, D., Oggeri, C., Vinai, R. (2007), “Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1622-1625.
 31. Petri, D.F.S. (2015), “Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applica-

- tions”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 132, No. 23, pp. 1-13.
32. Quebaud, S., Sibai, M., Henry, J.P. (1998), “Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 173-180.
 33. Sulaiman, H., Taha, M.R., Abd Rahman, N., Taib, A.M. (2022), “Performance of soil stabilized with biopolymer materials - xanthan gum and guar gum”, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 128, 103276.
 34. Sworn, G. (2021), Xanthan gum, In *Handbook of Hydrocolloids*, Woodhead Publishing, pp. 833-853.
 35. Wiszniewski, M., Cabalar, A.F. (2014), Hydraulic conductivity of a biopolymer treated sand, In *New Frontiers in Geotechnical Engineering*, ASCE, pp. 19-27.
 36. Zhou, X., Yang, Y. (2020), “Effect of foam parameters on cohesionless soil permeability and its application to prevent the water spewing”, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 5, pp. 1787-1797.
 37. Zumsteg, R., Messerklinger, S., Puzrin, A.M., Egli, H., Walliser, A. (2009), “Pressurized vane shear test for soil conditioning”, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, pp. 275-278.