

이수식 쉴드 TBM 배니곡관 마모 최소화를 위한 기초 연구

이수진¹ · 김현도² · 김용우³ · 김상환^{4*}

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 석사

²학생회원, 호서대학교 토목공학부 석사과정

³학생회원, 호서대학교 건축토목공학부 학사

⁴정회원, 호서대학교 건축토목공학부 교수

A fundamental study on the minimize wear of slurry shield TBM sludge bend pipe

Soo-Jin Lee¹ · Hyeon-Do Kim² · Yong-Woo Kim³ · Sang-Hwan Kim^{4*}

¹Master Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

²Master's Course Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

³Undergraduate Student, Dept. of Architectural and Civil Engineering, Hoseo University

⁴Associate Professor, Dept. of Architectural and Civil Engineering, Hoseo University

*Corresponding Author : Sang-Hwan Kim, kimsh@hoseo.edu

Abstract

Currently, due to industrial development in domestic regions, buildings are saturated not only in major city centers but also in surrounding urban areas. Accordingly, people's attention has focused on underground spaces, and tunnels are being widely used, especially in urban development. Research on tunnels and tunnel excavation methods is actively underway. However, there is a lack of research on the wear and tear problems of sludge discharge pipes when using a slurry shield TBM. Therefore, in this paper, the L-shaped bend pipe used in the existing sludge discharge pipe was transformed into a T-shaped bend pipe to move sludge. As a result, it was confirmed that compared to the L-shaped bend pipe, the impact of the T-shaped bend pipe on the bend pipe when discharging sludge was reduced. Based on these results, it is expected that wear of the sludge discharge pipe can be minimized by using a T-shaped bend pipe when using slurry shield TBM equipment. This is expected to ultimately lead to economic benefits, such as reducing costs due to replacement of curved pipes or additional welding during tunnel construction.

Keywords: Slurry shield TBM, L-shaped bend pipe, T-shaped bend pipe, sludge, pipe wear

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(3)243-254(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.3.243>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 22, 2024

Revised May 24, 2024

Accepted May 28, 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

초 록

현재 국내 지역의 산업 발달로 인해 주요 도심은 물론 주변 도시 지역에도 건축물이 포화 상태이다. 이에 따라 사람들의 관심은 지하공간으로 쏠리게 되었고, 특히 도시개발에 있어서 터널은 광범위하게 활용되고 있다. 이에 따라 터널 및 터널 굴착공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이수식 쉴드 TBM 사용 시 슬러지 배출관의 마모 및 파손 문제에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존 슬러지 배출관에 사용된 L자형 곡관을 T자형 곡관으로 변형하여 슬러지를 이동시켰다. 그 결과, L자형 곡관에 비하여 T자형 곡관이 슬러지 배출 시 곡관에 미치는 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 이수식 쉴드 TBM 장비 사용 시 T자형 곡관을 사용하면 슬러지 배출관의 마모를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 결국 터널 공사 시 곡관 교체나 추가 용접에 따른 비용을 절감하는 등 경제적 이익으로 이어질 것으로 기대된다.

주요어: 이수식 쉴드 TBM, L형 곡관, T형 곡관, 슬러지, 배관의 마모

1. 서론

현재 국내에서는 산업의 발달로 인하여 주요 도심지는 물론 외곽 도심지들까지도 건물들로 포화 된 상태이다. 이에 따라 현재 사람들의 관심은 지하 공간에 쏠리고 있다. 지하 공간의 대표적인 활용방법으로는 터널이 있으며 터널의 발달은 지상 공간 확보에 많은 이점이 있다. 터널에 대한 연구가 이루어짐에 따라 터널 굴착공법에 대한 연구 또한 활발하게 진행되고 있다.

기본적인 터널 공법으로는 NATM (New Austrian Tunneling Method) 공법에 의한 재래식 공법과 TBM (Tunnel Boring Machine)을 사용한 기계식 굴착공법이 있다. 재래식 공법은 전통적으로 암반을 굴착할 때 사용하는 대표적인 공법으로 사용되었으나, 소음, 진동 및 환경적인 문제로 인하여 도심지 적용에 한계가 있다. 반면 TBM을 사용한 기계식 굴착공법은 무소음·무진동 및 공사비·공기 감소 등의 이점이 있으므로 현재 국내뿐만이 아닌 세계적으로 많이 사용되고 있다(Ahn et al., 2006).

TBM 공법은 쉴드의 유무에 따라 Open TBM과 쉴드 TBM으로 나뉜다. 쉴드 TBM은 한국터널공학회(KTA, 2008)에서 정한 굴진면의 안정성 확보가 필요한 토사 및 연약지반 터널, 도심지 천층 터널 및 하·해저 터널에 활용된다. 이렇듯 쉴드 TBM 공법은 도심지 하부 저토퍼 구간뿐만 아니라 하·해저 구간 시공방법으로 국내·외에서 그 적용이 확대되어 시공이 증가하고 있는 실정이다(Bang, 2020).

현재 국내·외 전반적으로 TBM 공법을 활용한 시공이 증가하는 추세이다. 그렇기 때문에 현재 국내의 쉴드 TBM에 관한 연구에 있어 디스크커터(disc cutter) 및 커터 비트(Cutter Bit)와 세그먼트에 관한 연구가 많이 수행되고 있다(Kim et al., 2021). 쉴드 TBM 공법 중 이수식 쉴드 TBM에 관한 연구도 많이 이루어지고 있지만 대부분 디스크커터(disc cutter) 및 막장압 관련 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 이수식 쉴드 TBM 사용 시 슬러지 배출 시 생기는 배니곡관 마모에 대한 문제에 대해서는 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 이수식 쉴드 TBM의 배니곡관 마모 최소화를 위한 기초적 연구를 수행하였다.

2. 연구 배경

2.1 이수식 쉴드 TBM 공법

이수식 쉴드 TBM 공법은 지상플랜트와 연결된 송니관을 통해 챔버 내에 이수를 가압함으로써 막장면에 불투수성의 이수막을 형성하여 붕괴와 용수유입으로부터 안정성을 유지한다. 또한 굴착 시 발생한 굴착토는 이수와 혼합되어 배니관을 통해 지상으로 반출된다(Kim et al., 2021). 다음 Fig. 1은 이수식 쉴드 TBM 공법 시스템도이다. 이처럼 배니관은 이수식 쉴드 TBM 공법에서 배토에 필요한 주요 설비이며 굴착 시 계속 사용하게 된다.

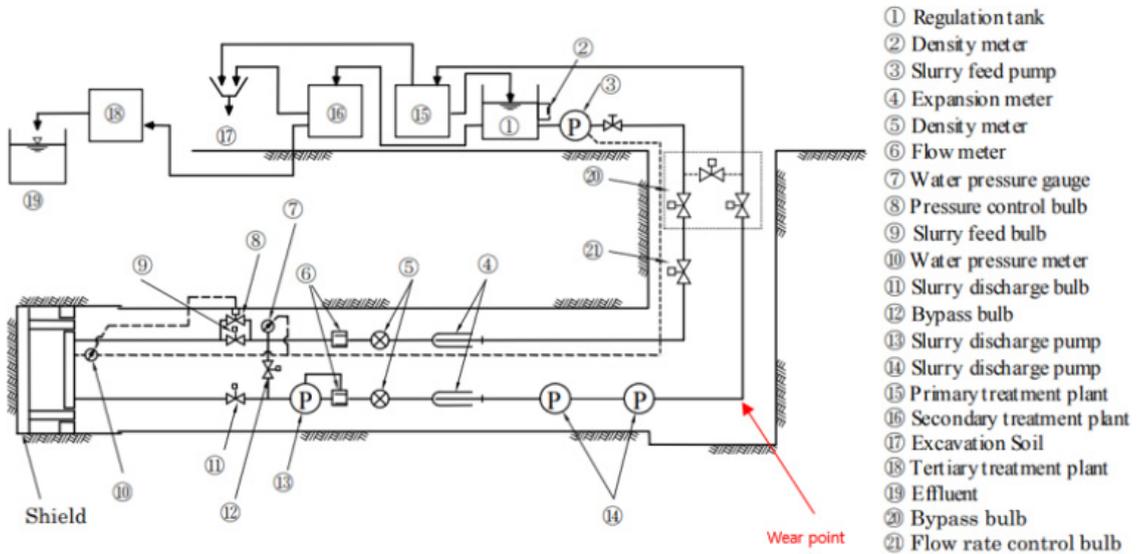


Fig. 1. Slurry shield system JSCE (2016)

배니관에 지속적인 슬러지의 이동으로 마모가 발생되므로 마모 부분의 교체 및 수리가 필요하여 배토처리에 어려움이 발생한다. 연구에 따르면 배니관의 마모량 측정 방법은 직접계측 방법(direct measurement methods), 파이프 플로우 루프 시험(Pipe flow tests), 슬러리의 장시간 이동으로 인한 마모율을 모사하는 시험 방법(accelerated testing methods)이 제시되었다(Pak et al., 2017).

본 연구는 기존 배니관의 곡관부와 다른 형태의 곡관부에 발생하는 마모량을 비교하고 최적의 곡관부 형태를 찾아 교체 및 추가적인 수리를 최소화해 비용적인 측면을 덜어내고자 실험을 진행하였다.

2.2 배니곡관 마모에 대한 이론적 분석

이수식 쉴드 TBM에서 슬러지를 배출할 때 사용되는 배니곡관은 주로 L형 곡관으로 설치되어 있다. 이에 따라 슬러지가 운반되며 곡관부에 직접적으로 부딪히면서 충격이 전해져 마모가 진행된다.

다음 Fig. 2 및 Fig. 3은 곡관부에 충격이 가해지는 경로와 실제 현장에서 마모가 된 곡관의 모습을 나타낸 것이다. Fig. 2와 같은 경로로 슬러지가 이동하며 충격이 가해지다 보니 사용한지 오래된 곡관은 자연스럽게 마모가 진행되며 곡관을 교체해야 한다는 단점이 발생하게 된다. 이러한 마모를 최소화 하기 위해서는 배니관에 운반되는 슬러지와 물의 농도가 중요하다. 또한 배니관에 슬러지 침전 및 관의 마모를 최소화 하기 위해 관의 재질, 유량, 크기 그리고 슬러지의 종류를 고려하여 유속을 산정하는 것이 중요하다.

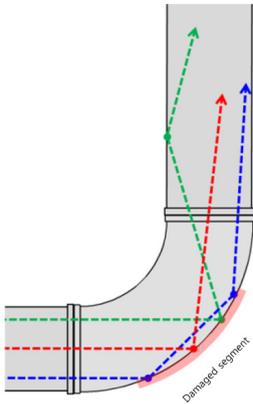


Fig. 2. Sludge movement path



Fig. 3. Example of wear of bend pipe

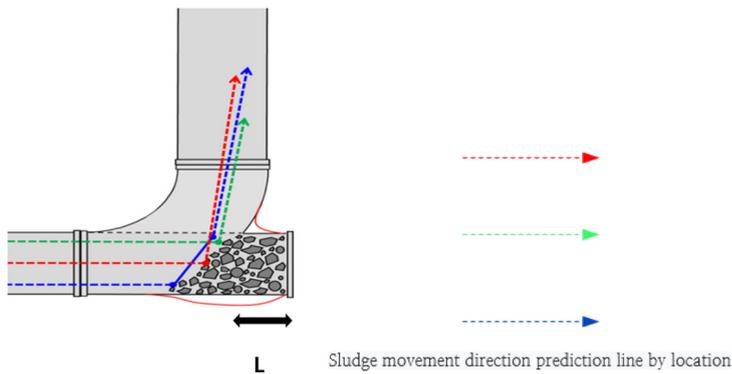


Fig. 4. Expected appearance of sludge inside T type bend pipe

이와 같은 단점을 보완하기 위해 기존의 사용되는 L형 곡관을 Fig. 4와 같이 T형 곡관으로 대체하여 사용하면 마모가 일어난 부위에 슬러지가 쌓이면서 서로 부딪혀 배니관에 직접적으로 전달되는 충격이 완화되어 마모를 최소화시킬 것이다. 그리고 Fig. 2와, Fig. 4에 표시된 화살표는 위치에 따른 슬러지의 이동방향 예측선을 색깔 별로 나타내었다. 또한 T형 곡관의 길이 L에 따라서 슬러지가 쌓이는 양이 달라질 것이고, 이는 연장된 관의 끝부분에 전달되는 충격량의 변화를 예상할 수 있다.

2.3 배니곡관 마모 부분 충격량 이론적 분석

이수식을 이용한 배토처리 과정에서 위에 Fig. 2에 표시된 배니곡관 마모 부분의 충격량을 계산하기 위해서는 마모 부분에 전달되는 힘과 이 힘이 Δt 동안 전달하는지를 고려하였고, 이를 대학물리학(Wilson et al., 2010)에 언급된 뉴턴의 운동법칙(Newton's law of motion)을 활용하여 식 (1)을 통해 충격량(I)을 이론적으로 나타내었다.

$$I = F \times \Delta t \text{ (N} \cdot \text{s)} \quad (1)$$

위 식 (1)에 힘(F)는 굴착 시 발생한 자연상태의 흙 그리고 1960년 Schneidereit의 아이디어에 의해 이수식 설 드 TBM굴착시 벤토나이트를 이용한 이수(Roh et al., 2012)가 적용되었다는 것을 고려하여 벤토나이트, 물 등을 섞은 혼합물로 가정하여 작용하는 힘으로 도출하였고, 이는 운동량 보존법칙에 의해 펌프에 힘이 운동량 0인 혼합물에 전달되었다고 할 수 있으므로 힘(F)는 펌프의 힘이라고 할 수 있다. 혼합물에 펌프의 힘이 어느 정도 전달 되는지를 측정하기 위해 혼합물에 면적을 고려했을 때 식 (2)로 변형 할 수 있다. 이때 A는 혼합물이 이동하는 관의 면적이며, 이는 관속에 자유 수면이 없다고 가정한 것이다.

$$I = P \times A \times \Delta t \text{ (N} \cdot \text{s)} \quad (2)$$

위 식 (2)는 관속 혼합물이 이동할 때 발생하는 추가적인 저항 값을 배제하였을 때 적용이 가능하며, 혼합물에 무게 및 혼합물이 관속에서 이동하면서 발생하는 저항을 고려하여 식 (3)을 도출하였다.

$$I = \left(P \times \frac{\pi \cdot d^2}{4} + m \times g + F_R \right) \times \Delta t \text{ (N} \cdot \text{s)} \quad (3)$$

여기서, m = 혼합물의 질량, F_R = 혼합물이 관을 통과하면서 발생한 추가적인 저항 값, g = 중력가속도

위에 언급된 식 (1), 식 (2), 식 (3)을 통한 충격량 계산은 이론적 추정 값이며, 현장에서의 이수식 배토 처리는 배니곡관 곡관부에 발생하는 여러 가지 변수로 인해 이론적 분석으로는 정확한 측정은 어렵다. 그러므로 구체적인 충격량을 값을 도출하기 위해서는 이수식 배토처리 과정에서 현장에서 발생할 수 있는 다수의 조건을 고려해야 한다.

3. 곡관 마모에 대한 축소모형 실험

3.1 축소모형 실험 장비 및 곡관

본 실험에서는 배니곡관이 기존에 사용되는 L형 곡관에서 새로운 곡관의 형태인 T형 곡관으로 모양이 달라짐에 따라 슬러지가 곡관에 전달하는 충격량을 검토하기 위해 축소모형 실험 장비를 제작하여 실험을 진행하였다. 아크릴 파이프로 제작된 배니곡관에는 현재 이수식 쉴드 TBM에서 사용되고 있는 L형 곡관과 새롭게 고안된 T형 곡관을 각각 설치한 후 슬러지를 이동시켜 운반되는 형상을 확인하고 충돌되는 지점에 충격량을 확인하였다. Fig. 5는 축소모형 실험 장비 제작도이다. Fig. 5의 제작도를 참고하여 Fig. 6과 같은 축소모형 실험 장비 Fig. 6(a)를 제작하고 Fig. 6(b) 입체도를 통해 충격량 측정 지점을 표시하였다.

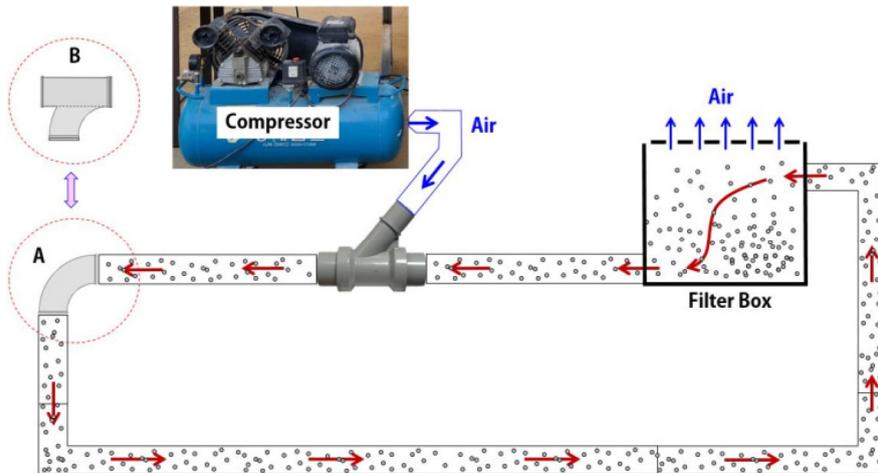
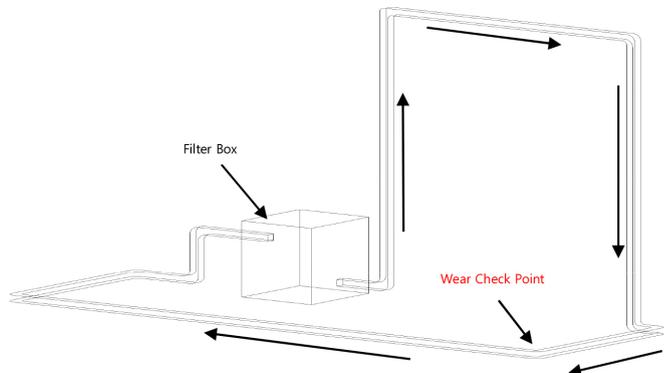


Fig. 5. Manufacturing of scale model experimental equipment



(a) Picture view



(b) Isometric view

Fig. 6. Sludge withdrawal bend pipe model production

슬러지의 이동이 잘 보일 수 있도록 배니곡관은 투명 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였다. 축소모형 실험에 사용할 관의 지름은 40 mm로 제작하였고, 현장에서 배출되는 슬러지의 크기가 다양해서 특정 크기를 정하기에는 어려움이 있어 축소모형 실험에 사용될 배니곡관 지름의 약 1/10정도 크기인 플라스틱 소재의 지름 6 mm, 무게 2g의 원형 청색 시료를 준비하였다. Fig. 7은 슬러지 대체 시료 사진이다. 배니곡관의 형태는 기존에 사용되던 L형 곡관과 새롭게 고안된 T형 곡관으로 제작하였으며 Fig. 8은 T형 곡관의 축소모형 제작도다. Fig. 9, Fig. 10은 축소모형으로 제작한 L형과 T형 곡관이다. 곡관에 슬러지를 이동시킬 때는 Air Compressor를 사용하여 공기를 주입하여 곡관을 따라 슬러지가 이동할 수 있도록 연결하였다. Fig. 11은 Air Compressor 사진이다. Air Compressor와 배니곡관을 연결하여 슬러지가 이동할 수 있도록 하는 연결부는 Fig. 12와 같이 싱크대 Y형 연결관을 사용하여 공기와 슬러지가 만나 같이 이동할 수 있도록 하였다.

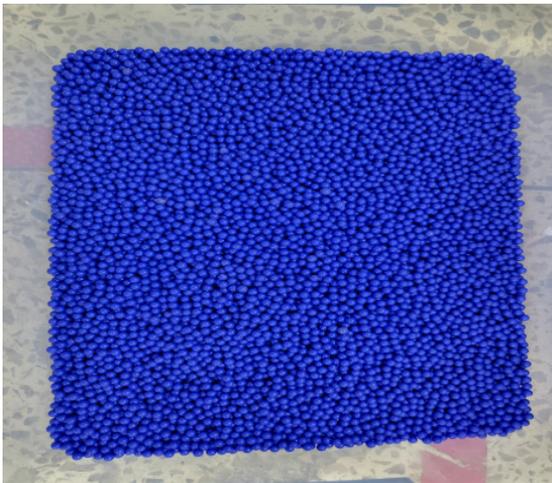


Fig. 7. Sludge replacement sample

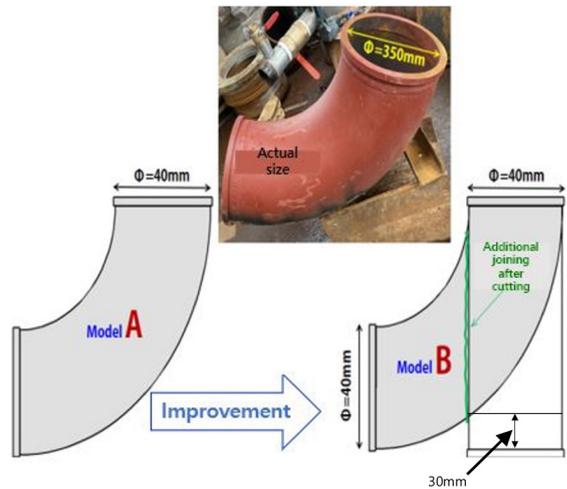


Fig. 8. T Bend pipe manufacturing method



Fig. 9. L type bend pipe



Fig. 10. T type bend pipe



Fig. 11. Air compressor

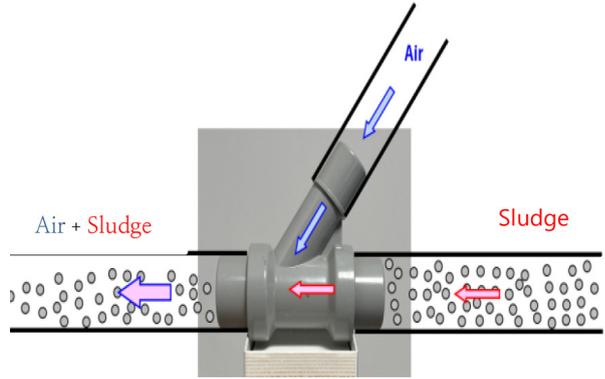


Fig. 12. Connection pipe

3.2 마모 부분의 충격량 분석

본 실험은 기존 배니곡관과 다른 형태의 곡관에서도 슬러지가 문제없이 배출되는지 확인한 후에 슬러지가 이동할 때의 곡관의 형태에 따른 충격을 측정하였다. 축소모형 실험 장비를 제작하여 실험하였으며 두 가지 Case로 구분하여 실험하였다. 다음 Table 1은 각 Case별 실험 조건을 나타내었다. 또한 이번 축소모형 실험은 압력에 의해 이동되는 슬러지가 벽에 부딪혀 발생하는 충격량과 마모 상태를 확인하고, 마모가 발생하는 부분에 L형 곡관과 T형 곡관에 마모 차이를 확인하였다. 기압(Air pressure)은 아크릴로 제작한 파이프가 손상은 받아도 부서지지 않게 30,000 Pa로 설정하였다.

Table 1. Experimental conditions for each case

Case	Bend pipe type	Air pressure	Continuous impact time	Time to reach wear section	Sludge movement distance
Case A	L type	30,000 Pa	60 sec	1.3 sec	5.4 m
Case B	T type	30,000 Pa	60 sec		

위 Table 1에 조건을 적용하여 곡관부에 발생하는 마모모습과 충격량을 계산하였다. 충격량을 계산하기 위해 대체시료에 작용하는 힘 F는 식 (4), 식 (5)를 이용하여 $F = 8.481 \times 10^{-6} \text{ (N} \cdot \text{s)}$ 도출하였다.

$$F = P \times A \tag{4}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \tag{5}$$

여기서, P = 대체시료에 작용하는 압력, A = 대체시료가 지나가는 구간의 횡단면적

다음으로 축소모형 실험을 통해 대체시료가 마모발생 지점까지 도달하는 시간 1.3초 측정하였고 Table 1에 대체시료에 이동거리 L 값을 적용하여 대체시료가 갖는 속도를 식 (6), 식 (7)로 구한 결과 $V = 4.1538$ (m/s) 값을 도출하였다.

$$V = \frac{L}{T} \text{ (m/s)} \quad (6)$$

식 (6), 식 (7)을 통해 구한 값을 통해 최종적으로 마모구간에 작용하는 충격량을 식 (8)을 통해 $I = 5.0886 \times 10^{-4}$ ($N \cdot s$) 도출하였다.

$$I = F \times \Delta t \text{ (N} \cdot \text{s)} \quad (7)$$

여기서, Δt = 충격이 지속적으로 가해지는 시간

식 (7)을 통해 도출한 충격량은 Case A 인 경우 마모 부분에 발생하는 충격량이며. Case B에 경우 대체시료가 마모 부분에 처음도달 하는 순간에 충격량을 측정한 후에 아래 Fig. 13과 같이 시료가 쌓이게 되면서 마모 부분에 발생하는 충격량이 감소하였다. 축소모형 실험을 통해 대체시료가 Case B의 T형 곡관에 부딪히는 시간을 30회 측정하여 평균 0.1초가 측정되었고 이를 통해 Case B에 처음 도달 하였을 때 발생하는 충격량을 식 (7)로 계산한 결과 충격량 $I = 8.481 \times 10^{-7}$ ($N \cdot s$) 값을 도출하였다. 하지만 첫 충돌 이후에 Fig. 13과 같이 대체시료가 쌓이면서 지속적인 충격량이 감소하는 모습을 관찰하였다.



Fig. 13. Replacement samples piled up in a T type pipe

3.3 석고코팅을 통한 내부 마모도 측정

본 실험에서는 case별 곡관 내부의 마모를 측정하기 위하여 Fig. 14와 같이 곡관 내부에 석고를 바른 후 내시경 카메라를 사용하여 곡관의 석고 손상도를 확인하여 Case A, B 곡관의 마모도를 비교하였다. 아래 Fig. 15 Case A 실험 결과를 보면 슬러지가 이동함에 따라 석고가 많이 손상된 것을 확인할 수 있다.

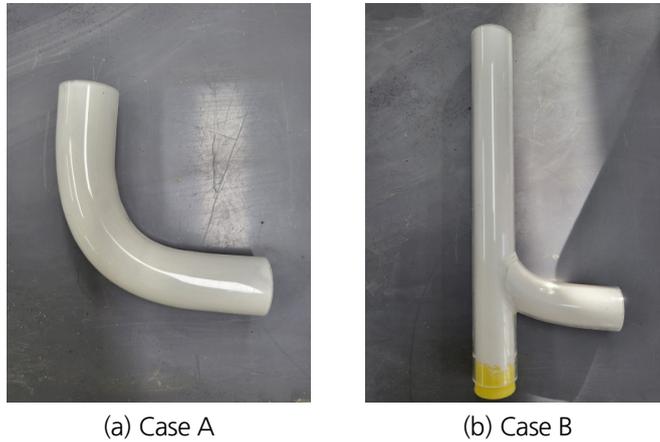


Fig. 14. Appearance of the curved pipe after applying plaster

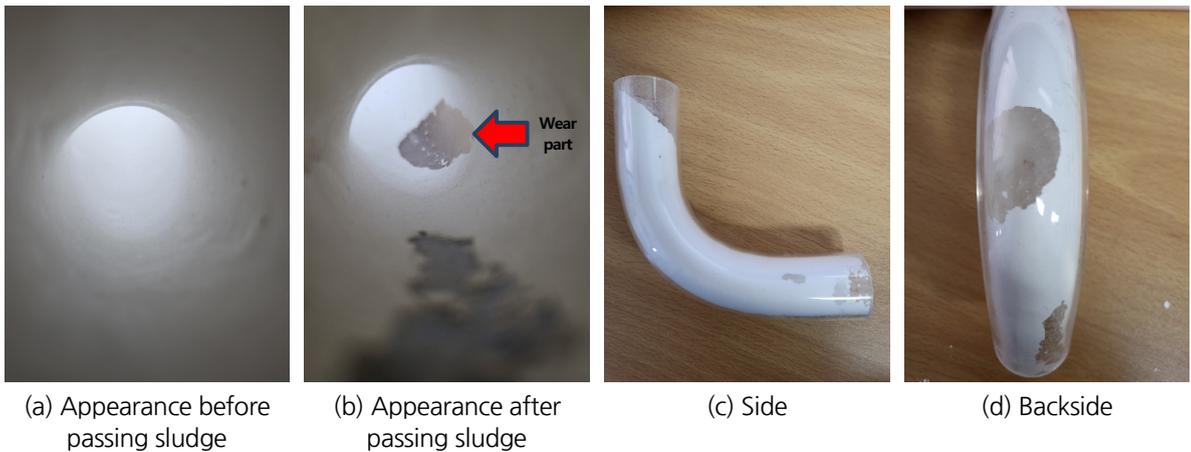


Fig. 15. Experiment Case A results

다음 Fig. 16은 Case B에 대한 실험 결과 사진이다.

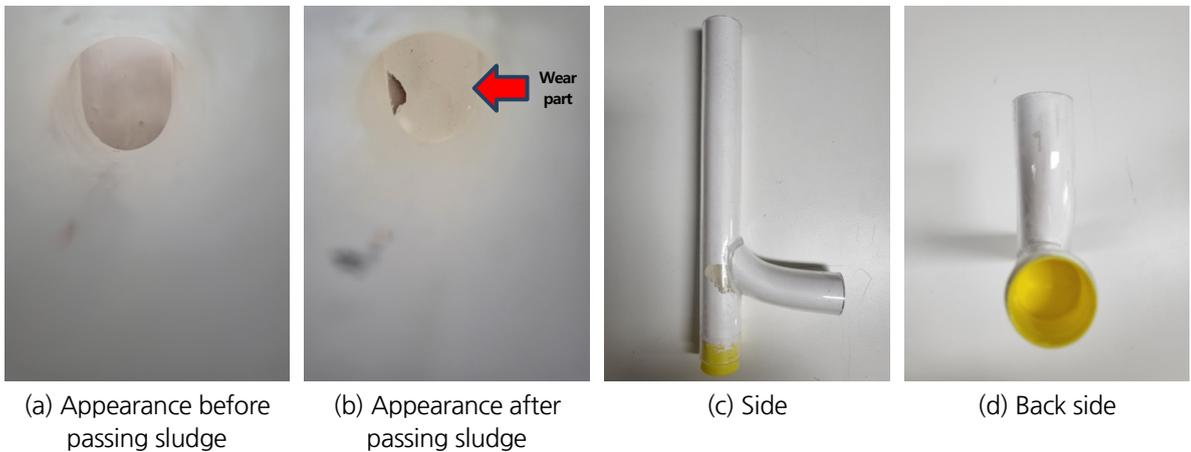


Fig. 16. Experiment Case B results

위의 Case B의 실험 결과를 보면 Case A와 동일한 조건으로 슬러지를 이동시켰음에도 불구하고 Fig. 4에 나타내는 T형 부분에 슬러지가 쌓이면서 충격이 분산되어 곡관부에 충격이 직접적으로 가해지지 않아 Fig. 16과 같이 석고 손상이 미미하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그러므로 위 식 (7)을 통해 구한 충격량 5.0886×10^{-4} (N·S)이 마모 부분에 전달되었을 때 Case A와 B의 손상 차이를 확인할 수 있었다. 추가적으로 Fig. 4에 T형 관의 길이 L를 증가했을 경우 연장된 관 길이만큼 대체시료가 쌓이는 양도 증가할 것이고, 이는 연장된 관 끝 부분에 전달되는 힘이 점차 감소한다는 것을 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 이수식 쉴드 TBM 장비를 사용하여 시공할 때 슬러지에 의하여 배니곡관이 마모되는 현상을 공학적 원리를 응용하여 최소화시킬 수 있는 연구를 진행하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

1. 배니곡관을 기존 L형 곡관에서 T형 곡관으로 변형하였을 때 6 mm 크기의 슬러지가 문제없이 이동하는 것을 확인할 수 있었으며, 곡관의 마모를 방지하기 위하여 배니곡관의 형태를 변형하더라도 슬러지 배출에 문제는 없을 것으로 확인되었다.
2. 곡관에 석고를 바른 후 진행한 축소모형 실험에서 L형 곡관의 경우에 슬러지가 이동하며 곡관부에 직접적으로 충격을 주면서 지나가 마모가 발생되었지만, T형 곡관의 경우에 슬러지가 T형 부분에 쌓이면서 슬러지끼리 부딪혀 곡관부에 손상이 발생하지 않고 마모를 방지할 수 있으며 충격량이 감소하는 것을 확인하였다.
3. 위의 실험 결과를 토대로 이수식 쉴드 TBM의 배니관을 L형에서 T형으로 변형한다면 배니관의 마모를 최소화할 수 있으며, 이에 따라 곡관을 교체하거나 추가 용접을 진행하면서 발생하였던 비용을 줄일 수 있게 되어 경제적 측면에서 이득을 취할 수 있을 것이라 기대된다.

추후 연구를 통하여 T형 곡관의 길이변화, T형 곡관의 특정 부분에 개폐가능성, 배니곡관 내부에 슬러지 이동의 영향요인 등을 고려한다면 더 경제적이고 편리한 곡관을 만들어 실제 현장에서 사용할 수 있을 것이라 기대된다.

저자 기여도

이수진은 연구 계획 및 실험, 논문 작성을 하였고, 김현도는 자료조사 및 실험을 하였고, 김용우는 실험 및 실험 결과 정리를 하였으며, 김상환은 실험 및 논문 검토를 하였다.

References

1. Ahn, J.P., Lim, J.C., Yoon, H.J. (2006), "A study on the support design of railroad tunnel by NATM", Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference, Vol. 10, Gwangju, pp. 4688-4691.
2. Bang, G.M. (2020), Model testing and analysis of clogging in shield TBM cutterhead opening area, Doctoral Thesis, Hoseo University Graduate School, pp. 1-2.
3. JSCE (2016), Japanese tunnel standard specification, Japan Society of Civil Engineers, pp. 211.
4. 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.
5. KTA (2008), Tunnel technology lecture, Korean Tunnelling and Underground Space Association, pp. 14-33.
6. Pak, T.P., Kim, T.K., Ko, T.Y. (2017) "A study on the discharge pipes wear of slurry shield TBM in rock strata", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 1, pp. 57-70.
7. 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.
8. Wilson, J.D., Buffa, A.J., Lou, B. (2010), College Physics - Sixth Edition, Translated by Jang, K.A., Yoon, D.H., Kim, W.T., Lee, S.H., Jang, P.W., Lee, M.S., Yeom, T.H., Sang Hak Dang, Seoul, pp. 144-153.