급곡구간 굴착을 위한 쉴드-TBM 축소모형 장비 시스템 개발

공민택[1] · 김연덕[2] · 이경헌[1] · 황병현[3] · 안준규[1] · 김상환[4*]

[1]비회원, 호서대학교 대학원 토목공학과 석사과정
[2]정회원, 호서대학교 대학원 토목공학과 박사과정
[3]학생회원, 호서대학교 대학원 토목공학과 석사과정
[4]종신회원, 호서대학교 토목공학과 교수

Development of shield-TBM scale model system for excavation of curved section

Min-Teak Kong[1] · Yeon-Deok Kim[2] · Kyung-Heon Lee[1] · Beoung-Hyeon Hwang[3] · Jun-Kyu An[1] · Sang-Hwan Kim[4*]

[1]Master Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University
[2]Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University
[3]Master Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University
[4]Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

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

Abstract

This paper is a study on the development of equipment system to obtain data on stability in excavation of sharp curve section of Shield TBM. Shield TBM equipment is being used a lot recently for tunnel excavation. Excavation may result in inevitable detours by buildings above the ground or existing underground structures. Pre-construction simulation is required to verify the stability of the construction in case of this. Therefore, it is necessary to establish an automated control system through the development of this equipment system and conduct simulation through simulation of excavation model in the sharp curve section. A system shall be developed to control the left and right angles and thrust of the equipment, and to view data on the earth pressure and propulsion pressure of the equipment in real time during excavation. With this system, the necessary data can be collected for field testing through excavation method and excavation simulation by angle. It is expected that it will be very useful in assessing the actual Shield TBM by conducting a scale-down model experiment.

Keywords: Shield TBM, Excavation simulation, Control system

초 록

본 논문은 쉴드 TBM의 급곡구간 굴착 시 안정성에 대한 데이터를 얻기 위한 장비 시스템 개발 연구이다. 최근 터널 굴착에 쉴드 TBM 장비가 많이 활용되고 있다. 굴착 시 지

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(6)849-860(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.849

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 19, 2019
Revised October 24, 2019
Accepted October 30, 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

반 상부의 건물이나 기존 지하 구조물에 의해 불가피 하게 우회해야 할 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에 대비하여 시공의 안정성을 확인하기 위해 시공 전 사전 시뮬레이션이 필요로 한다. 그러므로 본 장비 시스템 개발로 자동화 제어시스템을 구축하여 급곡구간 굴착 모형 시뮬레이션을 통해 모의실험을 진행한다면 안정성을 높일 수 있을 것이다. 장비의 좌·우 각도 및 추력 등을 제어하며 굴착 시 장비에 받는 토압, 추진압에 대한 데이터를 실시간으로 볼 수 있도록 시스템을 개발하여야 한다. 이 시스템으로 굴착 방법과 각도 별 굴착 시뮬레이션을 통한 현장실험에 필요데이터를 수집할 수 있다. 실제 쉴드 TBM 공사 전 축소모형 실험을 통한 평가 시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 쉴드 TBM, 급곡구간 굴착, 제어시스템

1. 서 론

도시의 빠른 성장과 도심지로의 인구 밀집으로 인해 지상 구조물이 급격히 늘어났으며 유동인구 증가로 현재 지반 상부는 과포화 상태이다. 이로 인해 교통체증, 주차문제 등이 발생되며 지상 구조물의 밀집화는 사회적으로 큰 문제를 일으킨다. 이러한 문제를 해소하고자 사회기반 시설들을 지하화하는 것이 지속적으로 논의되고 있다. 그러나 지하공간을 활용하기 위해선 소음으로 인한 민원 발생, 기존 구조물(지하철, 상수도 등)의 간섭이 지하공간 시공에 문제점이 되고 있으며, 시공 시 지상 구조물의 안전성 또한 고려하여야 한다.

도심지에 터널 공사를 시행하기 위해 TBM공법을 사용하며 이는 소음과 분진을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 발파공법에 비해 굴착손상 영역이 작다는 장점이 있어 국내외에서 적용 사례가 증가하고 있다(Cho et al., 2008). 이에 따라 국내에서는 Chang et al. (2013)에 의한 커터 링의 형상에 따른 디스크커터 작용력의 실험적 평가, Kang et al. (2015)에 의한 복합지반에서의 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도에 따른 커터비트 손상에 관한 실험적 연구 등 쉴드 TBM 커터헤드에 대한 많은 연구가 활발하게 일어나고 있다. 국외의 경우 커터헤드는 물론 Sugimoto et al. (2007)에 의한 복합지반 곡선구간에서 쉴드 터널링 거동 시뮬레이션에 대한 연구 등 지반 거동을 고려한 곡선구간 추진 기법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

해외의 연구와는 다르게 TBM의 급곡구간 굴착에 대하여 국내에서는 연구가 활발하게 진행되지 않는 현실이다. 국내의 경우 TBM 터널 관련 기준 및 시방서를 살펴보면 TBM 터널의 급곡선 시공에 대한 구체적인 설계 및 시공지침이 제시되어 있지 않으며, 급곡구간 시공 시 예견치 못한 안전사고 및 추가비용, 공기 지연 등 여러 문제들이 발생하고 있다(Kang et al., 2017).

따라서 본 연구는 급곡구간 굴착이 가능한 쉴드 TBM을 축소 제작하여 굴착 시 장비에 작용하는 지반 압력을 측정하고 분석하는 연구로써, 국내 쉴드 TBM의 급곡구간 굴착에 있어 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 급곡구간 굴착 시뮬레이션 실험 장비

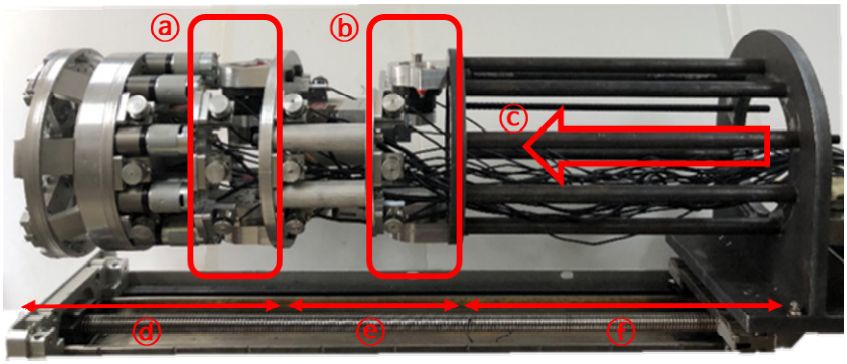
축소모형실험은 현지의 지반물성과 구조물의 형상 등을 축소율(Scale factor)로 환산하여 현지의 상태를 재현해 낼 수 있으며, 상사법칙을 적용하여 실제와 근사한 축소장비를 제작하고 굴착지반을 유사하게 모델링하여 실험함으로써 원지반에 대한 굴착 시 지반거동을 분석할 수 있다(Oh et al., 2011). 이에 따라 축소모형 장비는 실제 운용되고 있는 장비에 대해 1/45의 축소율을 적용하여 제작하였다.

2.1 실험장비 제작 및 검증

실험장비는 직경 12 m TBM 장비에 대하여 축소율을 적용하여 축소모형으로 제작하였다. 제작된 장비의 제원은 Table 1과 같으며 제작된 장비는 Fig. 1과 같다.

Table 1. The specifications of actual equipment and miniature equipment

Classification	Faceplate diameter (mm)	Length (mm)			RPM
		Hood	Girder	Tail	
Miniature equipment	270	300	250	320	0~12

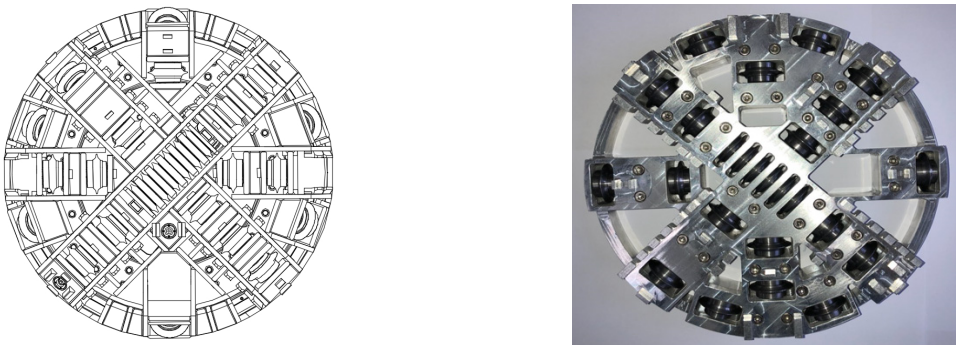


(a) Primary rotation (b) Secondary rotation (c) Direction of progress (d) Hood (e) Girder (f) Tail

Fig. 1. Shield TBM view of excavation of fabricated curved sections

2.1.1 커터헤드 제작

커터헤드는 단단한 지반을 굴착할 때 용이하도록 개별 커터 비트와 디스크 커터를 제작하였으며 커터헤드가 회전하며 굴착을 진행할 때 디스크 커터는 굴착면의 압력과 커터헤드의 회전으로 인해 함께 움직이게 제작하였다. 설계도와 제작된 커터헤드는 Fig. 2와 같다. 디스크 커터는 축소율에 맞게 제작하였으며, 직경 33.5 mm로써 총 25개가 제작된 커터헤드에 적용되어 있다.

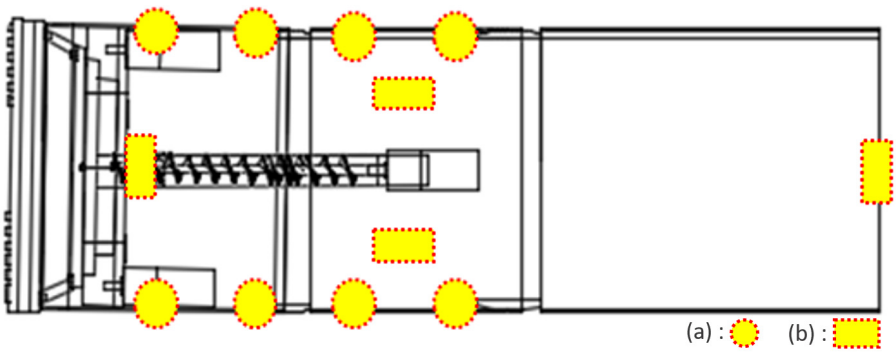


(a) Blueprint (b) Foreground

Fig. 2. Cutter head

2.1.2 토압 및 추력 측정

Fig. 3은 모형 장비를 상부에서 봤을 때의 모식도이며 토압계 및 Load cell의 위치를 표시하였다. 제작된 장비는 커터헤드를 작동시키기 위해 후드부에 DC 모터 10개, 굴착 시 지반에 의해 측정되는 압력을 측정하기 위하여 Fig. 3의 (a) 지점마다 상·중·하 위치로 3개씩 구성하여 총 24개, 좌·우 추력을 측정하기 위한 Load cell 5개를 설치하였다. 토압계의 경우 D = 27 mm, H = 21 mm의 소형 센서이며, 추력 측정을 위한 Load cell은 500 N 용량의 센서를 사용하였다. 1, 2차 회전부에 서브모터를 통해 힘을 유지하면서 회전이 가능하도록 제작하였다. 또한 엑추에이터를 통해 장비의 추진력을 높였다.



(a) Earth pressure sensor (b) Load cell

Fig. 3. Position diagram of stress sensor

장비 운용에 앞서 각 토압계의 검증을 진행하였다. 검증은 500 g 추를 이용해 1.5 kg의 무게까지 총 3단계 진행을 하였으며, 이는 각 토압계의 오차범위 파악 및 데이터 활용에 중요한 요소이다. 측정값은 Table 2~3과 같으며, 각 센서는 후드부의 상단부터 1번으로 명칭 하였다.

Table 2. Earth pressure measurement of left

Load (g)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
500	503.2	502.2	503.4	500.8	502.2	503.2	501.2	500.1	501.2	502.1	501.1	500.4
1000	1005.6	1003.8	1006.7	1001.5	1004.4	1006.3	1002.3	1000.3	1002.4	1004.3	1002.2	1000.8
1500	1508.9	1506.6	1508.7	1501.9	1506.5	1509.7	1503.5	1500.3	1503.7	1506.8	1503.2	1501.1
Error rate	0.6%	0.4%	0.7%	0.2%	0.4%	0.6%	0.2%	0%	0.2%	0.4%	0.2%	0.1%

Table 3. Earth pressure measurement of right

Load (g)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
500	501.4	502.1	501.2	503.4	501.1	501.3	501.8	500.4	500.2	501.1	500.4	500.4
1000	1002.7	1004.2	1002.4	1006.8	1002.4	1002.5	1003.5	1000.8	1000.4	1002.2	1000.8	1000.8
1500	1503.8	1505.3	1503.5	1510.6	1503.5	1503.8	1505.3	1501.3	1500.6	1503.4	1501.1	1501.2
Error rate	0.3%	0.4%	0.2%	0.7%	0.2%	0.3%	0.4%	0.1%	0%	0.2%	0.1%	0.1%

장비에 설치한 추력 측정용 Load cell 검증을 위하여 반력 판을 활용하였다. 반력 판으로 장비의 이동을 억제하며, 장비를 일정한 힘으로 작동시켰을 때 Load cell에 측정되는 값을 확인하였다. 각 Load cell에 있어 후드부 상단은 S1, 하단은 S2, 거더부 좌측은 S3, 우측은 S4, 테일부는 S5로 명칭 하였다. 측정 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Propulsion measurement

Operating force (kN)	S1	S2	S3	S4	S5
20	19.8	20.6	20.3	20.7	20.1
40	39.8	40.2	40.5	41.3	40.2
60	59.2	61.1	60.1	61.8	60.7
80	79.5	82.7	81	82.2	80.4
100	99.2	102.8	101.4	102.5	103.1
Error rate	0.8%	2.8%	1.4%	2.5%	3.1%

2.1.3 장비 급곡부 구성

장비의 급곡구간 굴착이 가능하게 하기 위하여 후드부와 거더부에 기어 및 모터를 추가로 설치하였다. 이는 장비가 1차, 2차 회전이 가능하게 하였으며, 회전부가 한 개 있는 경우보다 더욱 완만한 회전이 가능하게 한다. 또한 장비의 급곡구간 굴착 시 과부하를 억제시킨다. Fig. 4를 통해 후드부와 거더부 별개의 회전이 가능함을 확인 할 수 있다. 후드부의 회전과 거더부의 회전은 각각 최대 15°의 각도로 좌·우 회전이 가능하다. 회전각은 Laser point로 각도 검증을 진행하였으며, 이는 약 0.5%의 오차율을 보인다.

(a) 15-degree rotation of hood (b) 15-degree rotation of girder

Fig. 4. Left and right excavation system internal view

2.1.4 Screw conveyor

장비의 지반 굴착 시 발생하는 버력처리를 위해 Screw conveyor를 구성하였다. Screw conveyor는 1, 2차 회전부와 같은 각도로 움직일 수 있도록 구성하였으며, 직경 35 mm 총 길이 900 mm로 제작하였다. 제작한 Screw conveyor는 Fig. 5와 같다.

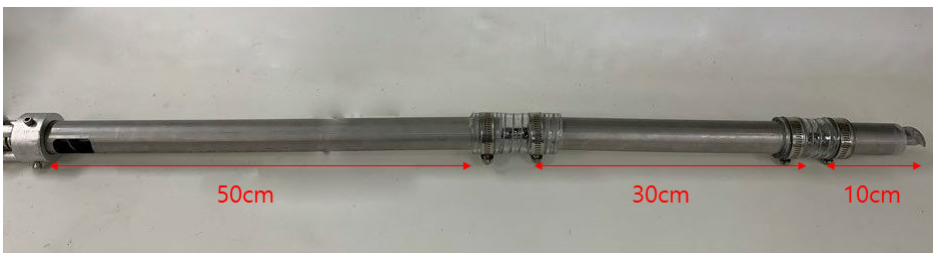


Fig. 5. Screw conveyor

2.2 자동화제어 시스템

축소모형 장비를 작동시키기 위한 시스템으로써 장비 작동시 추진하는 속도 및 힘을 조절할 수 있으며, 설정한 각도로 좌·우 회전 제어가 가능하다. 이는 Fig. 6과 같이 제어프로그램 UI를 통해 컴퓨터로 실시간 제어 조작 가능하다. 또한 Fig. 7과 같이 센서의 값을 초기화(Zero Setting)가 가능하게 만들어 오차범위를 최대한 줄여주었다. 각 조절 UI에 대한 설명은 Table 5와 같다.

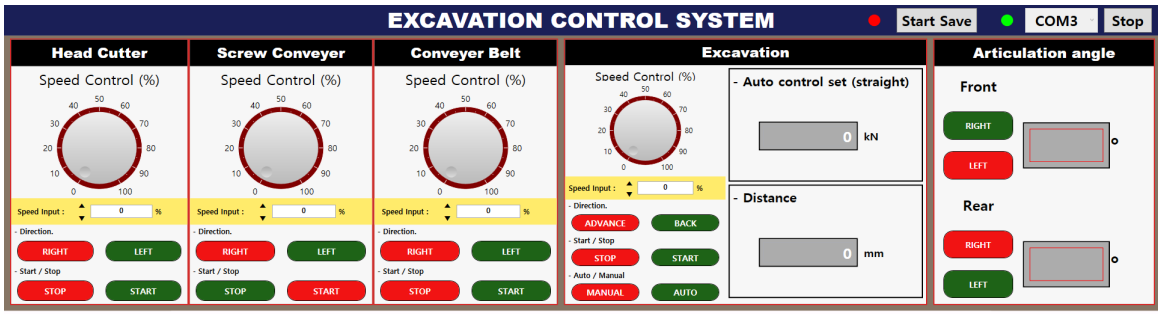


Fig. 6. Control system UI

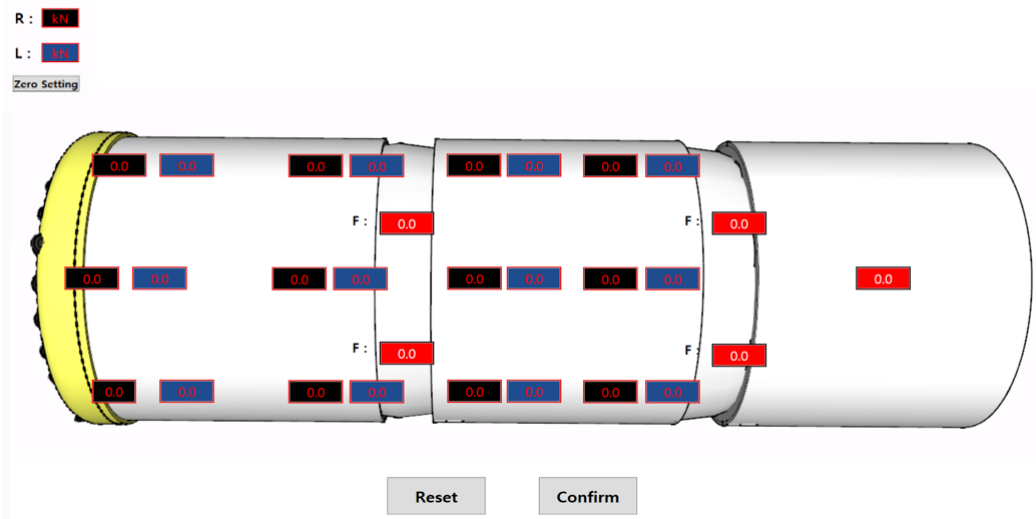


Fig. 7. Zero setting for each sensor

Table 5. Control principle of each control system UI

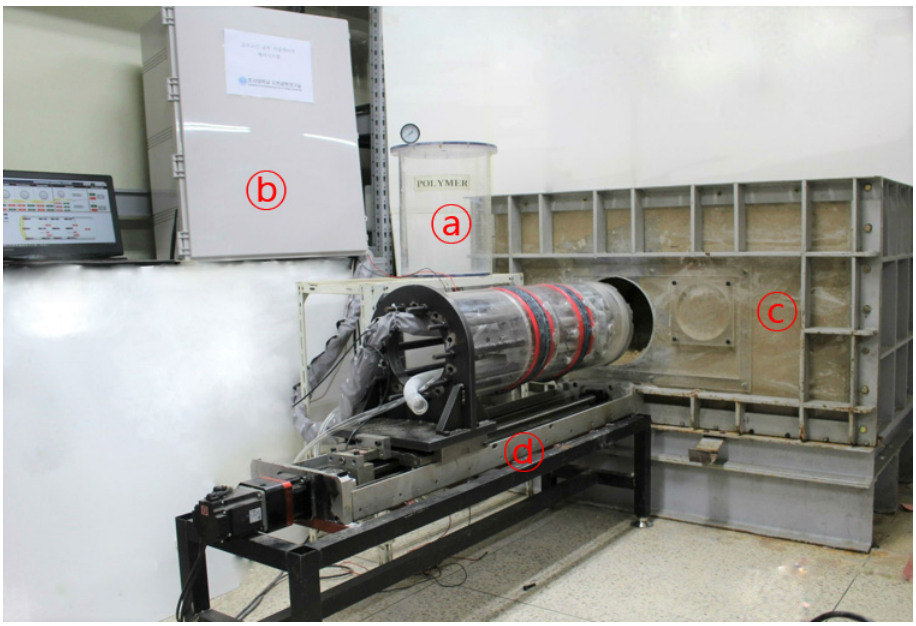
Classification	Operation principle
Head cutter	- Rotate the Cutter Head for ground excavation and control 10 DC motors simultaneously. - Motor speed can be adjusted with dial buttons, top and bottom buttons, and three direct inputs.
Screw conveyor	- A dial that controls the screw conveyor to handle soil-bearing forces occurring at the same time as excavation, and controls the DC motor.
Conveyor belt	- It is a belt-operated dial to handle the soil-based force transferred from the screw conveyor to the conveyor belt.
Excavation	- Front/rearward actuating dial for excavating the ground, which controls the AC motor. When auto is selected, it is automatically operated according to the value entered in the auto control set and distance on the right. When manual is selected, it is manually operated according to Stop/Start.
Articulation angle	- It is controller of 1st and 2nd rotation part and controls AC motor and inputs angle in angle input box on the right and clicks left / right button to give angle of rotation part.

3. 축소모형 장비를 활용한 지반 굴착 시뮬레이션

3.1 실험 개요

제작된 장비를 활용하여 800 mm의 직선구간 굴착을 진행하였다. 이는 급곡구간 시뮬레이션에 앞서 장비의 각 기능이 제대로 작동하는지 여부를 판단하였으며, 추력 및 토압 측정에 중점을 두어 굴착을 진행하였다.

쉴드 TBM의 직선 굴착 시 지반으로부터 받는 토압의 거동을 분석하기 위하여 구성한 장비 전경도는 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 (a)는 첨가제로써 굴착토를 유동화시켜 배토를 원활하게 해주기 위해 사용하였으며, (b)는 자동화 제어 시스템, (c)는 토조, (d)는 제작된 쉴드 TBM이다.



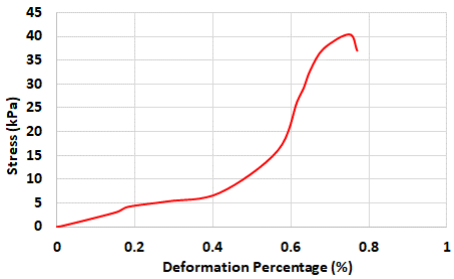
(a) Additive (b) Automated control system (c) Soil ground tank (d) Scaled model shield TBM

Fig. 8. Panoramic view of scaled model test

3.2 지반 조성

축소 모형 TBM 실험을 통해 정확한 데이터를 얻기 위해서는 실험장비뿐만 아니라 축소모형지반 조성 또한 매우 중요하며, 이로 인해 원지반과 유사한 축소모형지반을 조성하여야 한다(Kim, 2011). 지반 조성을 위하여 1,260*700*780 mm의 토조를 제작하였으며, 이를 풍화암으로 조성하여 장비의 굴착을 진행하였다. 풍화암 지반은 실내 다짐실험을 통해 조성하였으며, 원지반 대비 1/45로 축소한 일축압축강도 값을 비교 분석하여 유사한 강도를 선정하였다. 선정된 실험 값은 Table 6과 같다.

Table 6. Results of compression test

Classification			Unit	Weathered rock
Geotechnical site design ground integer			kPa	1400
1/45 Ground integer at scale down			kPa	31
Scale model experiment	Mixing cost	Sand	g	300
		Gypsum	g	15
		Water	g	47.25
	Number of tramp		times	1
	Tramp energy		kg · cm/cm^3	0.05
	Unconfined compression strength		kPa	40
	Modulus of deformation		kPa	1745
	Stress-deformation percentage graph		-	

3.3 실험 결과

조성한 지반에 대한 장비 굴착을 통해 장비에 작용한 좌측 토압, 우측 토압, 추력 데이터를 측정하였다. 이는 실제 TBM 장비 굴착과 유사한 조건 및 결과를 확인하기 위하여 커터헤드 회전속도를 3 RPM으로 유지하며 실험을 진행하였다. 장비에 작용한 좌측 토압 데이터는 Fig. 9, Table 7과 같다.

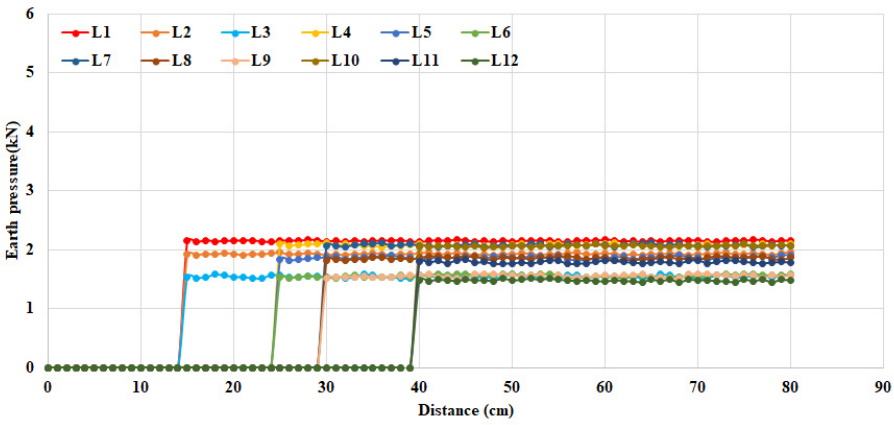


Fig. 9. Left earth pressure measurement result graph

Table 7. Left earth pressure measured value

Classification	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Earth pressure (kN)	2.15	1.93	1.55	2.08	1.85	1.54	2.06	1.84	1.55	2.05	1.80	1.48

각 토압계에 측정된 측정값을 확인해보면 상단에 위치한 L1, L4, L7, L10이 약 2.10 kN으로 유사하게 측정되었다. 또한, 중단에 위치한 L2, L5, L8, L11과 하단에 위치한 L3, L6, L9, L12이 각각 약 1.86 kN, 1.53 kN으로 유사하게 측정되었다. 그리고 토압계 모두 굴착이 종료될 때까지 일정하게 토압이 유지되었다.

장비에 작용한 우측 토압 데이터는 Fig. 10, Table 8와 같다.

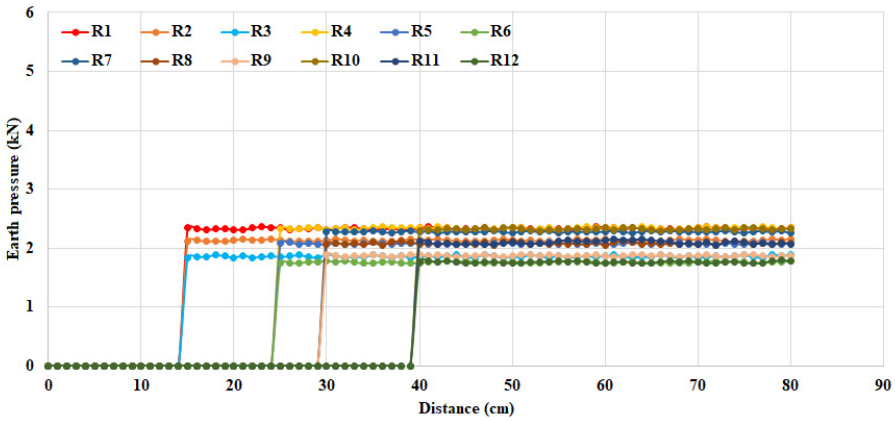


Fig. 10. Right earth pressure measurement result graph

Table 8. Right earth pressure measured value

Classification	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Earth pressure (kN)	2.34	2.13	1.85	2.32	2.08	1.75	2.28	2.06	1.88	2.30	2.11	1.77

각 토압계에 측정된 측정값을 확인해보면 상단에 위치한 L1, L4, L7, L10이 약 2.31 kN으로 유사하게 측정되었다. 또한, 중단에 위치한 L2, L5, L8, L11과 하단에 위치한 L3, L6, L9, L12이 각각 약 2.08 kN, 1.80 kN으로 유사하게 측정되었다. 그리고 우측 토압계 또한 좌측 토압계와 마찬가지로 모두 굴착이 종료될 때까지 일정하게 토압이 유지되었다.

장비에 작용한 추력 데이터는 Fig. 11, Table 9와 같다.

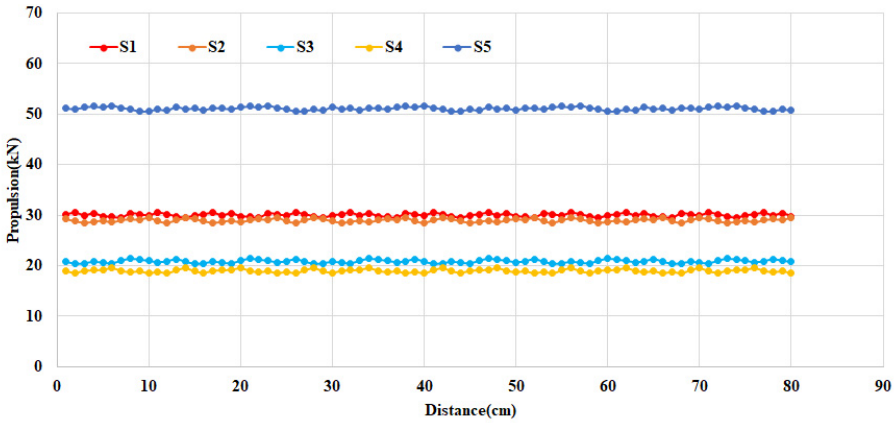


Fig. 11. Propulsion measurement result graph

Table 9. Propulsion measured value

Classification	S1	S2	S3	S4	S5
Propulsion (kN)	31	29	21	19	51

각 Load cell에 측정된 측정값을 확인해보면 후드부에 위치한 S1, S2가 약 30 kN으로 유사하게 측정되었다. 또한 거더부에 위치한 S3, S4는 약 20 kN, 테일부에 위치한 S5가 약 51 kN으로 측정되었다. 후드부는 막장면의 압력을 가장 근접하게 받아 거더부의 Load cell 보다 큰 값이 측정되었으며, 테일부의 Load cell은 장비 추진력에 의해 보다 큰 값이 측정되었다. 각 Load cell 모두 굴착이 종료될 때까지 일정하게 추력이 유지되었다.

4. 결 론

기존의 쉴드 TBM에 대한 연구는 커터헤드나 직선굴착에 관한 연구가 활발하였다. 이에 따라 본 연구에서는 급곡구간 굴착이 가능한 쉴드 TBM을 제어시스템과 함께 개발하여 국내 쉴드 TBM 연구에 도움이 되고자 한다. 본 연구에서 제작한 쉴드 TBM은 R = 30 m 급 급곡구간 굴착이 가능하도록 제작하는 것에 중점을 두었으며, 직경 12 m의 실제 장비에 1/45의 축소율을 적용하여 제작하였다. 제작된 장비 센서들의 오차율 검증을 진행하였고 시스템에서 자체적으로 보정하여 결과 값이 출력되도록 하였다. 개발된 제어시스템을 통해 장비에 작용하는 토압과 추력을 실시간 시뮬레이션이 가능하도록 하였다. 토조 내 지반을 모두 동일한 조건으로 조성하여 직선굴착 모형 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 측정된 토압 결과값을 비교해 보면 상단에서 하단으로 위치가 내려갈수록 토압이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 장비의 굴착에 있어 토압은 장비의 상부에 많이 가해지는 것을 파악하였다. 추력에 있어 후드부에 위치한 Load cell은 막장면의 압력을 근접하게 받게 되며, 테일부의 Load cell은 장비의 추진력에 의하여 좌 우측에 위치한 거더부의 Load cell 보다 큰 추력이 측정되는 것을 확인 할 수 있다.

쉴드 TBM의 직선굴착 통해 얻은 토압과 추력 등의 초기데이터로 향후 급곡구간 굴착을 진행해야 할 것이며, 추가적인 문제점을 도출하고 이를 더욱 발전해 나간다면 국내 기계화 시공의 공법 개발과 발전에 큰 기여가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업 '도심지 소단면(φ3.5 m급)터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술개발, (19SCIP-B105166-05)' 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Chang, S.H., Choi, S.W., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2013), "Experimental evaluation of the effects of cutting ring shape on cutter acting forces in a hard rock", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 225-235.
2. Cho, J.W., Yu, S.H., Jeon, S.W., Chang, S.H. (2008), "Numerical study on rock fragmentation by TBM disc cutter", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 139-152.
3. Kang, E.M., Kim, Y.M., Hwang, I.J., Kim, S.H. (2015), "A study on the damage of cutter bit due to the rotation speed of shield TBM cutter head in mixed ground", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 403-413.
4. Kang, S.O., Kim, H., Kim, Y.M., Kim, S.H. (2017), "Application technique on thrust jacking pressure of shield TBM in the sharp curved tunnel alignment by model tests", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 335-353.
5. Kim, J.D. (2011), A study on ground behavior of model test shield TBM during excavation, Engineering Structures, Hoseo University of Graduate School, Master's Degree, pp. 1-77.
6. Oh, T.S., Kim, B.S, Shin, H.C, Kim, S.H. (2011), "A study on ground behavior of shield TBM lunching area during excavation", Proceedings of the Korean Society for Railway Conference, Vol. 2011, No. 10, Jeju, pp. 353-364.
7. Sugimoto, M., Sramoon, A., Konishi, S., Sato, Y., (2007), "Simulation of shield tunneling behavior along a curved alignment in a multilayered ground", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 6, pp. 684-694.