

토압식 쉴드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템 개발에 대한 연구

김상환¹ · 오태상^{2*} · 박수환³ · 이충렬³ · 박종관⁴

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

²정회원, (주)삼보기술단 사장, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정

³비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

⁴정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수

Development of simulation equipment system on EPB shield TBM hood operation

Sang-Hwan Kim¹, Tae-Sang Oh^{2*}, Soo-Hwan Park³, Choong-Yeoul Lee³, Jong-Kwan Park⁴

¹Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Professor

²Sambo Engineering co. LTD. President, Seoul National University of Science & Technology, Graduate school of railroad, Doctor student

³Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Graduate student

⁴Dept of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Professor

ABSTRACT: This paper presents the development of simulation system on EPB shield TBM Hood operation. In recent, EPB shield TBM is widely used in the tunnel construction. Since the hood system of the EPB shield TBM is most important to excavate the tunnel, it is necessary to perform the simulation of hood system to investigate the design and operation parameters prior to tunnel construction. In order to carry out this study, the scaled simulation system was designed and developed. The model tests were performed to verify the developed system. During the simulation, the earth pressures developed in the chamber during tunnelling were measured to evaluate the operation technique. The test results obtained by the developed simulation system show clearly the similar behaviour of TBM hood compared with the field data. It was also found that the ground loss during tunnelling is dependent on the change of earth pressure in chamber. Therefore, the simulation system developed in this study will be very useful to evaluate the operation technique of the TBM hood prior to tunnel construction. In addition, this system will be applied in a various condition of ground to get the operating information.

Keywords: Hood of EPB shield TBM, Screw conveyor, Chamber, Simulation system

초 록: 본 논문은 토압식 쉴드TBM(EPB shield TBM)의 후드부에 대한 시뮬레이션 시스템 개발에 대한 연구결과이다. 최근 토압식 쉴드TBM은 터널굴착에 많이 활용되고 있다. 토압식 쉴드TBM의 후드부 시스템은 터널굴착에서 매우 중요하기 때문에 후드부 시스템의 설계 및 operation parameter의 평가를 위하여서는 시공전에 사전 시뮬레이션이 요구된다. 본 연구를 위하여 모형 시뮬레이션 장비 시스템을 설계 개발하였다. 개발된 시스템의 검증을 위하여 모형실험을 실시하였으며, 개발된 시스템을 이용하여 얻은 결과는 현장에서 얻을 수 있는 토압식 쉴드TBM의 거동과 유사한 결과를 보여주었다. 이 결과로부터 토압식 쉴드TBM 굴진시 지반 loss는 후드부 챔버에 발생하는 토압의 변화에 많이 의존되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 장비 시스템은 토압식 쉴드TBM공사 전 operation parameter를 평가하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 다양한 지반조건에서의 TBM operation에 관한 정보를 제공할 것이다.

주요어: 토압식 쉴드TBM의 후드부, 스크류 컨베이어, 챔버, 모형실험시스템

*Corresponding author: Tae-Sang Oh

E-mail: ots54@hanmail.net

Received March 5, 2014; Revised March 14, 2014;

Accepted March 18, 2014

1. 서론

근대 사회에 들어서면서 토목, 건설 기술의 발전을 통해 많은 도시 시설물들의 지상에서의 건설이 용이하였다. 하지만 도시의 급속한 발달과 경제성장으로 인해 인구의 집중과 함께 도시가 팽창되면서 지상 구조물의 밀집화로 인한 지하공간의 필요성이 대두되어 있으며, 지하철 건설, 전력구 및 하수관로 등 지하공간 활용이 활발해지고 있다. 이에 따라 도심지에서의 터널 공법이 많이 채택되고, 고도의 터널 기술들이 발전되고 있다. 대표적으로 쉴드TBM은 커터헤드가 회전하여 지반 굴착을 진행하고 챔버에 채워진 흙으로 압력을 유지하기 위하여 스크류 컨베이어(Screw conveyor)를 통해 배토되는 토압식 쉴드TBM (EPB shield TBM) 공법과 굴착한 토사를 이수와 함께 혼합하여 배토하는 이수식 쉴드TBM 공법이 있다. 여기서 쉴드TBM 공법의 스크류 컨베이어에는 두 가지 구동방식이 있는데 축 구동방식과 외통 구동방식으로 구분되며 샤프트식과 리본식으로 분류된다. 또한 지반에 따라 폴리머/폼(Foam) 비율이 달라지고 스크류의 내경, 케이스의 직경, 스크류 총 연장 등 조건의 변화에 따라 스크류 컨베이어의 성능을 분석할 수 있으며, 토압식 쉴드TBM의 굴착면 안정은 챔버, 스크류 컨베이어 등에 충만 압축된 버력에 의한 지반 접촉부에서의 유효응력 확보와 챔버의 수압 조절에 좌우된다. 특히 굴진면의 안정은 스크류 컨베이어의 회전력으로 제어가 되므로 스크류 컨베이어의 설계기술은 토압식 쉴드TBM의 설계에 있어 중요한 요소라 할 수 있다(한국터널공학회 2008).

국외의 경우 OWEN 등(2009)은 실험적 연구와 DEM기법의 비교를 통한 스크류 컨베이어의 성능에 대해 검증하였고, Raffaele 등(2008)는 실험적 연구를 통해 첨가제를 활용해 토사지반의 토압식 쉴드TBM의 적용성에 관해 연구하였으며, Y.YU (1997)는 개별 스크류에 대한 필요 토크를 이론적으로 검증하였다. 국내의 경우 김상환(2011)은 토압식 쉴드TBM의 스

크류 컨베이어 시스템에 관한 실험적 연구를 통하여 스크류 컨베이어의 배토 성능을 분석하였고, 한명식(2013)은 실내모형시험을 통한 연약지반의 쉴드TBM 터널굴착 모사를 통해 배토속도에 따른 막장전방의 지표침하에 관해 분석하였다. 또한 장수호(2006)는 TBM 커터헤드의 설계기술을 통하여 쉴드TBM의 주요 Parameter인 커터헤드 설계기술을 분석하였다.

이와 같이 현재 국내에서는 토압식 쉴드TBM 후드(Hood)부에 관한 연구는 물론 TBM의 굴진 성능을 좌우하는 스크류 컨베이어 설계기술에 대해서도 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 현장에 적용된 쉴드TBM을 조사 분석하여 이를 바탕으로 토압식 쉴드TBM의 굴진성능을 향상시킬 수 있는 후드부의 주요 Parameter에 관한 설계 기술의 확립을 위해 토압식 쉴드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템을 개발하였다.

2. 이론적 배경

전단면 굴착을 위한 커터헤드를 장착하고 있는 토압식 쉴드TBM은 막장면에 대하여 능동적인 지보방법을 제공한다.

Fig. 1과 같이 커터헤드와 헤드모터, 챔버가 포함된 후드부에서는 TBM 굴진 시 쉴드 내부에서 막장의 굴착과 동시에 흙막이 역할을 하게 되는데, 커터헤드 후면의 챔버를 굴착 토사 또는 버력으로 가득 채워 굴진면을 지지하면서 굴진하게 된다. 일반적으로 거더(Girder)부에 포함된 스크류 컨베이어의 회전력에

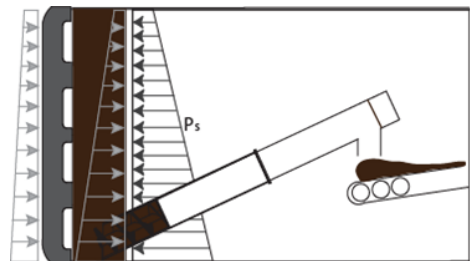


Fig. 1. Supporting principle of face

의해 굴진면에 주동토폰이 발생하지 않도록 해야 하기 때문에 굴진면 토압이 확실하게 스크류 컨베이어에 전달되지 않으면 안되므로 소성 유동화한 굴착토를 커터헤드 챔버 내에 가득 채우는 것이 매우 중요하다.

또한 굴진면 지지압력은 TBM 굴진속도와 스크류 컨베이어의 회전수에 의해 제어된다. 토압식 쉴드 TBM 공법에서 막장면 안정성의 주요 특징은 커터에 의해 굴착한 토사를 소성 유동화 시키면서 챔버 내에 충만 압축시켜 막장면을 지지하고 스크류 컨베이어 및 배토 조정장치에 의해 배토량을 조정해 굴착토량과 맞추면서 챔버 내의 토사에 압력을 갖게 해 막장면에 작용하는 토압과 수압에 저항시킨다. 챔버 내 및 스크류 컨베이어 내에 충만 압축시킨 토사에 의해 지수효과를 얻는다. 즉 토압식 쉴드TBM에서의 굴착면 안정성은 챔버, 스크류 컨베이어 등에 충만 압축된 버력에 의한 지반접촉부에서의 유효응력 확보와 챔버의 압력 조절에 좌우된다(한국터널공학회, 2008).

3. 토압식 쉴드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템 개발

3.1 토압식 쉴드TBM 사전조사

Fig. 2와 같이 토압식 쉴드TBM은 후드부, 거더부, 테일부로 구성되어 있다. 후드부는 커터헤드와 챔

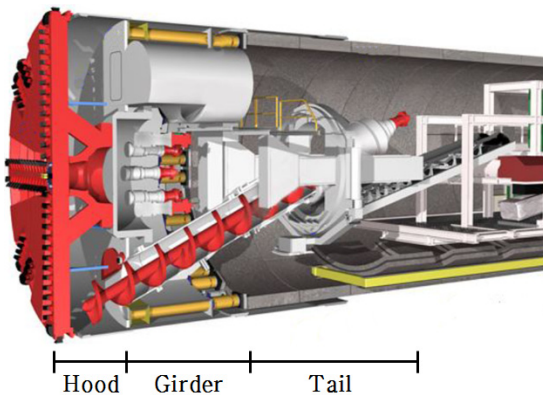


Fig. 2. Structure of the EPB shield TBM

버로 이루어져 있어 토사, 이토, 기포 등을 이용하여 안정을 도모하고, 거더부는 쉴드TBM의 Skin plate를 환상(環狀)이나 기둥으로 보강하여 쉴드 추진재, 커터헤드 구동장치, 중절장치 및 배토장치 등 굴진을 위한 장비를 설치하는 부분이며, 테일부는 복공체인 세그먼트를 조립하는 장치와 쉴드TBM의 외부의 토사 및 지하수 또는 뒤채움재 등의 유입을 막기 위한 테일 실이 있다(한국터널공학회 2008).

후드부 시뮬레이션 장비 시스템을 모사하기 위해 Fig. 3과 같이 각 현장별 적용된 스크류 제원을 조사 분석하였으며 커터헤드 직경에 따라 스크류 컨베이어 직경을 선정하여 설계 가능하도록 Design chart를 도출하였다.

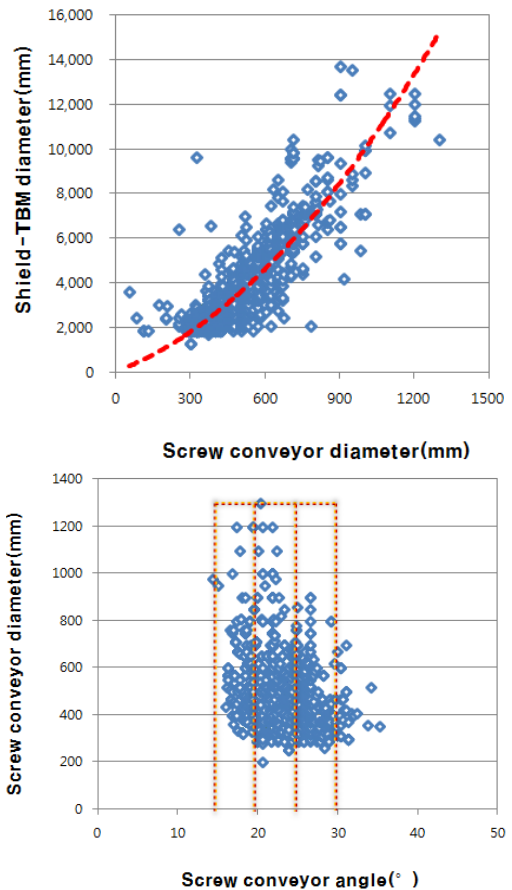


Fig. 3. Analysis of field TBM

3.2 토압식 쉴드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템 개발

챔버 내의 토압 변화와 거더부 스크류 컨베이어의 버력 배토효율 등 막장압 안정에 주요한 Parameter를 연구하기 위해 후드부 시뮬레이션 장비 시스템을 개발하였다. 사전 조사를 바탕으로 기성제품 모터의 토크와 스크류 컨베이어의 제원 등을 고려하여 1/10의 축소율을 적용하였다.

후드부 시뮬레이션 장비 시스템은 스크류 컨베이어 각도에 따른 버력 배토 효과와 하중 재하에 따른 챔버 내 토압 변화를 측정할 수 있으며 RPM, 스크류 컨베이어 각도, 스크류 각도를 조절 가능하도록 제작하였다.

후드부 시뮬레이션 장비 시스템 전경은 Fig. 4와 같으며, 스크류 회전 시 챔버 내 막장압을 분석할 수 있는 토압 센서를 챔버 전면과 후면에 각각 설치하였고, 스크류 컨베이어의 각도를 15°~35°로 조절할 수 있도록 설계되었다. 또한, 스크류 축에 동력을 전달할 수 있는 4개의 모터와 4개의 감속기로 이루어져 있으며, 감속기는 1:30의 비율이고 동시에 구동되어 스크류를 회전시킨다. RPM은 1~36 RPM까지 조절이 가능하다. 챔버에 작용하는 토압을 모사하기 위한 하중제어장치 및 첨가제를 투입할 수 있는 투입구로 구성하였고, 스크류 컨베이어 유출구 부분에는 배토량을 확인하기 위하여 Load cell을 설치하였다.

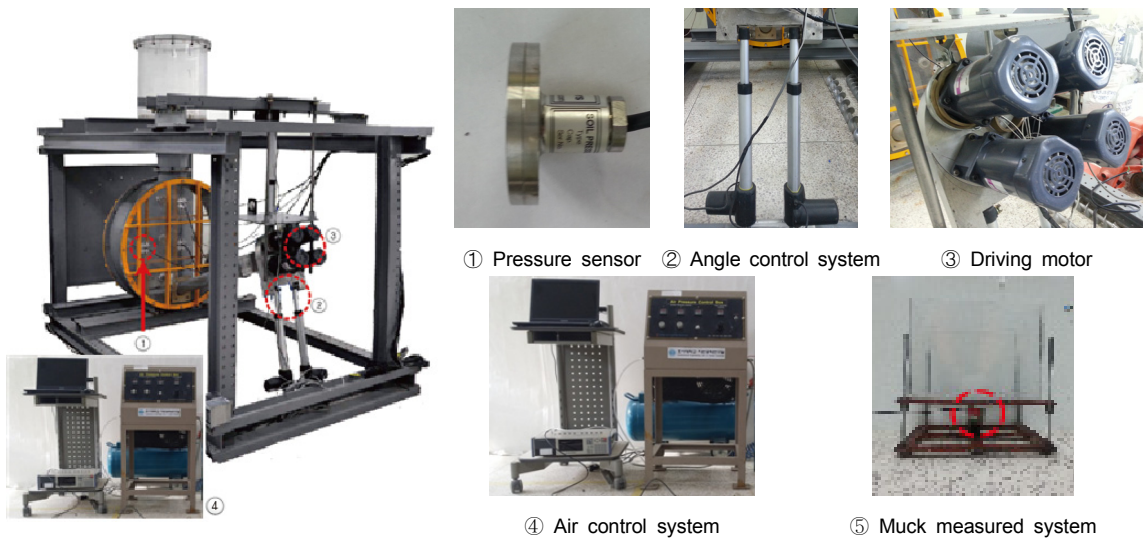


Fig. 4. Simulation system of EPB shield TBM

Table 1. Data of domestic field TBM

Zone	Cutter head diameter (mm)	Cutter head width (mm)	Screw conveyor diameter (mm)	Screw conveyor torque (kN-m)
Zone 1	7,740	2,500	900	123
Zone 2	7,890	2,480	900	125
Zone 3	7,930	2,495	900	125
Zone 4	7,370	2,480	1,000	211
Zone 5	7,310	2,500	1,000	211
Zone 6	7,730	2,485	900	150
Avg.	7,700	2,500	900	150

3.3 챔버 설계 및 개발

챔버는 일반적으로 쉘드TBM의 커터헤드와 격벽 사이의 공간을 말하며, 이 공간은 굴착된 버력을 일시적으로 저장하면서 막장에 압력을 제어/유지하는 곳으로 막장 안정의 중요한 부분이다. 국내에서 적용되었던 토압식 쉘드TBM을 대상으로 Table 1과 같이 조사 하였으며, 조사 결과 토압식 쉘드TBM의 평균 직경은 약 7,700 mm, 폭은 약 2,500 mm로 나타났다.

조사결과를 통해 토압식 후드부 시뮬레이션 장비 시스템의 챔버는 1/10의 축소율을 적용하여 800 mm의 직경으로 선정하였으며, 폭은 Fig. 5와 같이 250 mm로 산정되었다. 챔버 전면과 후면은 시료의 유동 상태를 확인하기 위하여 두께 20 t의 원형 아크릴로 제작되었으며, 챔버와 아크릴은 볼트체결을 했고, 시



Fig. 5. Width of chamber



Fig. 6. Prevention frame of bulging

료가 흐르는 것을 방지하기 위하여 원형 고무패드를 부착하였다. 또한 시료투입 시 챔버의 배부름을 방지하기 위하여 Fig. 6과 같이 배부름 방지 프레임을 제작하여 설치하였다.

토압식 쉘드TBM의 경우 챔버 내의 토압을 측정하기 위해 토압 센서를 설치한다. 토압 센서 설치 시 굴착 단면적, 지반 상태 등을 고려하여 토압 센서의 형식 및 설치 위치, 개수 등의 공사조건을 고려할 필요가 있다. 토압 센서는 챔버의 토압을 측정하는 목적이므로 헤드 전면부에 부착하는 것이 이상적이지만 보통은 커터 챔버 내 벌크 부분에 설치된다.

따라서 후드부 시뮬레이션 장비 시스템의 토압 센서는 챔버 내의 충전된 굴착토의 토압과 스크류 컨베이어 각도에 따른 버력 배토 효과, 하중재하에 따른 챔버 내의 토압 변화를 측정할 수 있도록 설치하였다. Fig. 7과 같이 챔버 전면부에는 상단부와 중앙부의 좌우측, 중앙에 각각 4개, 후면부에는 상단부와 하단부, 중앙부의 좌우측, 중앙에 각각 5개, 총 9개의 토압 센서를 설치하였다.

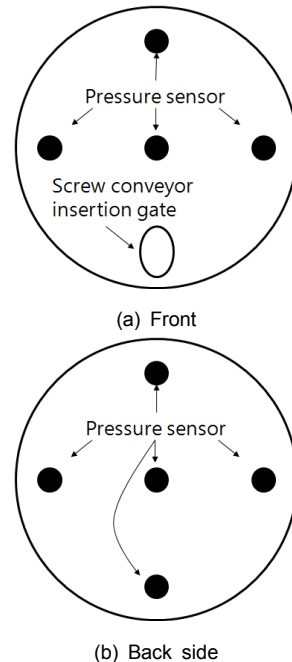


Fig. 7. Sensor installation position

3.4 스크류 컨베이어 설계 및 개발

버럭 배토의 효율은 스크류 직경, 축경(리본식의 경우 중공경), 스크류의 피치, 판의 두께로부터 정해지며, 스크류 컨베이어의 스크류 직경은 Table 2와 같이 약 300~1,000 mm가 적용되고 있다. 산정된 버럭의 크기와 토압식 실드TBM에 적용 가능한 스크류 컨베이어의 직경을 고려하여 샤프트식과 리본식으로 결정된다.

구동 방식은 일반적으로 Fig. 8(a)와 같이 샤프트식

스크류 컨베이어의 경우 구동 장치를 축에 연결하는 축 직결 구동 방식과 Fig. 8(b)와 같이 리본식 스크류 컨베이어의 경우 축이 없기 때문에 스크류의 일부를 외통과 일체 접합하여 구동하는 외통 구동 방식이 많이 사용되고 있다.

또한 배토 효율성을 위해서 회전수를 증가할 수 있으면 좋지만 배토 능력만을 우선으로 하여 회전수를 무한대로 증가시키면 스크류의 마모가 회전수와 비례해 진행되기 때문에 스크류의 이상 마모가 발생해 기계가 손상하는 원인이 된다(社団法人 地盤工學

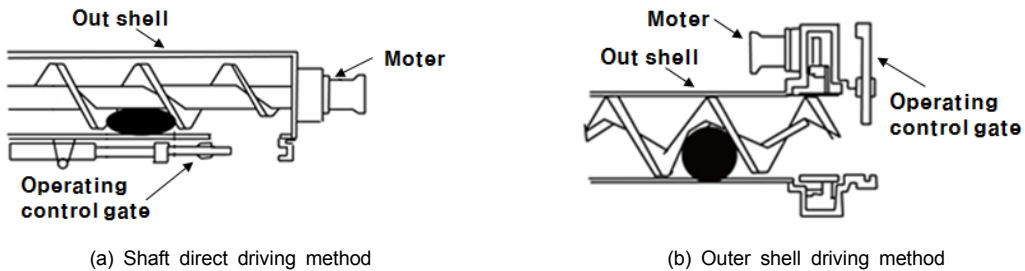


Fig. 8. Screw conveyor operation method (社団法人 地盤工學會, 1997)

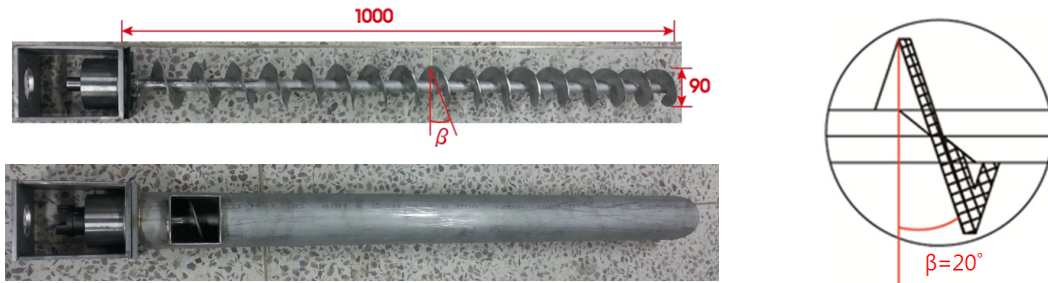


Fig. 9. Scale model screw

Table 2. An external diameter of TBM and screw diameter (社団法人 地盤工學會, 1997)

Shield diameter(m)	Screw diameter(mm)	Max muck size (mm)	
		Shaft-type	Ribbon-type
2.5~3.0	350	∅ 125 X ℓ 250	∅ 250 X ℓ 340
3.0~3.5	400	∅ 145 X ℓ 280	∅ 270 X ℓ 375
3.5~4.5	500	∅ 180 X ℓ 305	∅ 340 X ℓ 400
4.5~6.0	650	∅ 250 X ℓ 405	∅ 435 X ℓ 650
6.0 More	700~1000	∅ 280 X ℓ 415	∅ 470 X ℓ 700
		∅ 425 X ℓ 750	∅ 650 X ℓ 1000

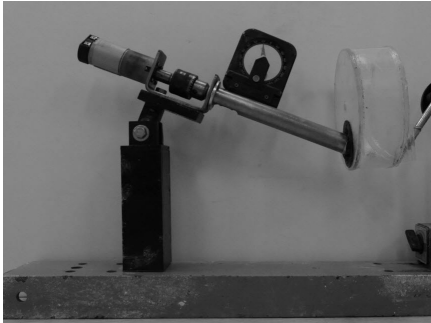


Fig. 10. Screw conveyor Experimental (Kim, S.H 2011)

회. 1997).

김상환(2011)은 Fig. 10과 같이 축소 개발한 스크류 컨베이어 실내모형 실험을 통해 단위시간당 버력량을 비교 분석하였다. 스크류 컨베이어 각도에 따른 단위 시간당 버력량을 측정할 결과 스크류 컨베이어 각도가 40°보다 0°에서 버력량이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 0°~10°일 때 함수비가 높으면 버력이 역류하는 현상이 발생되므로 20° ± 5°정도에서 버력이 가장 안정적으로 배토될 수 있다고 판단하였다. 또한 피치간격을 1:1 이내로 제작하는 것이 안정적으로 배토된다는 것을 확인하였다.

토압식 후드부 시뮬레이션 장비 시스템의 스크류는 사전 연구 및 조사를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 축소율 1/10을 적용하여 스크류 형태는 축 직결구동방식에 샤프트식으로 총 연장 1,000 mm, 직경 90 mm로 Fig. 9와 같이 제작하였다. 또한, 스크류 각도(β) 20°로

제작하였으며, 스크류 회전 RPM은 1~36 RPM까지 조절가능하게 제작하였다.

4. 토압식 쉘드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템 Operation에 관한 검증 실험

토압식 쉘드TBM의 후드부 시뮬레이션 장비 시스템의 검증을 위하여 모형실험을 실시하였다. 김상환(2011)의 사전연구를 바탕으로 스크류 제원을 다음 Table 3과 같이 선정하였다. 또한 본 실험에 이용한 점토 지반의 물성치는 Table 4와 같으며, 한명식(2013)의 버력 배출에 대한 도출된 폴리머 배합비를 바탕으로 폴리머 혼합액/점토 30%, 폴리머/물은 0.2%로 배합비를 선정하였다.

Fig. 11은 버력 배토에 따른 챔버 내 토압 변화를 나타내며, 상단부에서 하단부로 갈수록 챔버 내 토압은 증가하였다. 스크류에 의해 버력이 배토됨에 따라 Fig. 11(d)와 같이 스크류 컨베이어 투입구에 근접하게 위치한 토압 센서(P-3)의 토압 변화가 큰 폭으로 변화하는 경향이 나타났다. 반면 챔버 후면 상단부(P-1) 및 전면 중앙부(P-2)에 위치한 토압 센서의 경우 후면 하단부에 위치한 토압 센서(P-3)보다 변화폭이 미비한 것으로 나타났다.

챔버 내 압력은 스크류 컨베이어의 배토에 의해 제어되며, 챔버 내의 굴착도 유입과 배토를 병행하기

Table 3. screw conveyor data


Screw type(Shaft)	Screw conveyor angle (°)	Screw angle (°)	RPM
	25	20	20

Table 4. Ground condition

Ground	Clay
M/C (%)	25.38
qu (kN/m ²)	55.97
Cohesion (kPa)	4
ϕ (°)	13.04

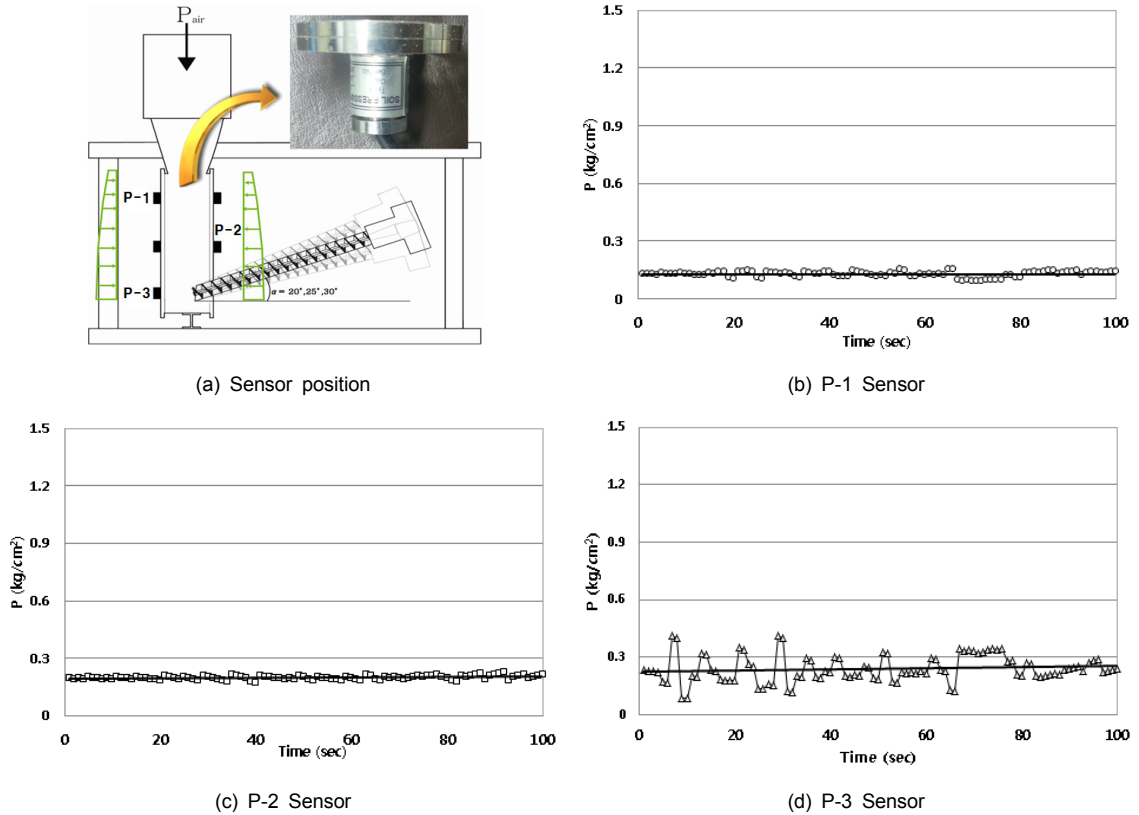


Fig. 11. Earth pressure

때문에 하단부 토압 센서(P-3)에서 토압 변화의 폭이 큰 것으로 판단된다.

토압식 쉘드TBM에서 챔버 내 굴착토는 굴착면의 안정을 확보한다. 굴진 시 굴착토를 배토함으로써 챔버 내 지지압력이 감소하게 되고 이로 인한 지표침하가 야기될 수 있다고 판단된다. 따라서 본 실험을 통해 스크류 각도, 스크류 회전수 등은 챔버 내 지지압력을 유지하는 데 중요한 요소로 판단되며, 향후 지반 상태를 고려한 최적의 operation parameter를 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

국내 현장에 적용된 토압식 쉘드TBM에 1/10 축소를 적용한 토압식 쉘드TBM의 후드부 시뮬레이션

장비 시스템은 스크류 컨베이어 각도, 스크류 형태, 스크류 각도 등의 조절이 가능하며, 챔버 내 토압 변화의 측정이 가능하도록 제작되었다.

후드부 시뮬레이션 장비 시스템의 검증을 위하여 모형시험을 실시하였으며 챔버 내 토압 변화를 측정하였다. 실험 결과, 챔버 내 토압은 하단부일수록 증가하였으며 하단부의 토압의 변화 폭이 큰 경향이 나타났다. 이는 챔버 내의 토사 유입과 배토를 병행하여 토압 변화의 폭이 큰 것으로 판단된다.

챔버 내 굴착토는 굴착면의 안정을 확보하므로 굴착토를 배토함으로써 챔버 내 지지압력이 감소하게 되어 지표침하가 야기될 수 있다. 향후 지반상태를 고려한 최적의 operation parameter를 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

향후 후드부 시뮬레이션 장비 시스템은 스크류 컨

베이어의 주요 Parameter에 따른 배토효율에 관한 연구와 챔버 내 토압 변화를 고려한 연구 등 다양한 연구에 활용될 것으로 기대되며, 현재 미비한 쉴드 TBM 후드부에 관한 연구를 촉진하고 설계 기술의 확립을 위한 기초적인 자료를 축적하는데 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신 사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호 : 10기술혁신 E09) - 토사지반 커터헤드 설계요소 핵심기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

- Owen, P.J., Cleary, P.W. (2009), “Prediction of 스크류 컨베이어 performance using the Discrete Element Method (DEM)”, Powder Technology, Vol. 193, No. 3, pp. 274-288.
- Raffaele Vinai, Claudio Oggeri, Daniele Peila (2008), “Soil conditioning of sand for EPB applications : A laboratory research”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, No. 3, pp. 308-317.
- YU, Y., Arnold, P.C. (1997), “Theoretical modelling of torque requirements for single Screw feeders”, Powder Technology Vol. 93, No. 1, pp. 151-162.
- Kim, S.H, Kim, J.D., Park, I.J. (2011), “An experimental study on screw conveyor system of EPB shield TBM”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 6, pp. 519-530.
- Jang, S.H., Lee, S.W. (2006), “Design technique of TBM cutter head”, Korean geotechnical society, Vol. 22, No. 1, pp. 22-23.
- Korean Tunnelling and Underground Space Association (2008) “A series of tunnel engineering 3 the mechanized tunneling techniques-Design”, CIR, pp. 27-32, 156.
- Han, M.S., Kim, Y.J., Shin, I.J., Lee, Y.J., Shin, Y.S., Kim, S.H. (2013) “Simulation of shield TBM tunneling in soft ground by laboratory model test”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 5, pp. 483-496.
- 社団法人 地盤工学会. (1997), “シールド工法の調査、設計から施工まで, 日本}, pp. 145. pp. 27-29.