

폼제에 의해 개선된 흙의 물성 도출을 위한 실내 가압 베인 전단시험 및 개별요소법의 적용

Application of Laboratory Pressurized Vane Shear Test and Discrete Element Method for Determination of Foam-conditioned Soil Properties

강태호¹, 이효범², 최항석³, 최순욱⁴, 장수호⁵, 이철호^{6*}

Tae-Ho Kang¹, Hyobum Lee², Hangseok Choi³, Soon-Wook Choi⁴, Soo-Ho Chang⁵, Chulho Lee^{6*}

¹Nonmember, Senior Researcher, Underground Space Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Republic of Korea

²Nonmember, Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., 145 Anam-Ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

³Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., 145 Anam-Ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Researcher, Underground Space Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Republic of Korea

⁵Nonmember, Senior Research Fellow, Construction Industry Promotion Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Republic of Korea

⁶Member, Senior Researcher, Underground Space Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Republic of Korea

ABSTRACT

In earth pressure balance (EPB) shield TBM tunnelling, the application of soil conditioning which improves properties of the excavated muck by additives injection, is generally used for enhancing the performance of TBM. Therefore it is important to apply the soil conditioning in the numerical model which simulates excavation performance of TBM equipment, but related studies on a method that simulates soil conditioning are insufficient to date. Accordingly, in this study, an laboratory pressurized vane test apparatus was devised to evaluate the characteristics of conditioned soil. Using the apparatus, the vane shear tests were performed on foam-conditioned soil with different shear rates, and the test was numerically simulated with discrete element method (DEM). Finally, the contact properties of particles in DEM were determined by comparing the results of test and analysis, and it indicates that the applicability of pressurized vane test and DEM model for reproducing soil conditioning in TBM excavation model with DEM.

요 지

토압식(EPB, earth pressure balance) 쉴드 TBM 공법에서 첨가제 주입을 통해 굴착한 흙을 개량하는 쏘일 컨디셔닝(soil conditioning) 기법의 적용은 TBM의 굴진성능을 향상시키는데 필수적이다. 따라서 TBM 장비의 굴진 성능을 모사하는 수치해석 모델에서도 쏘일 컨디셔닝을 적용하는 것은 중요하나, 이를 해석적으로 모사하는 기법에 대한 연구는 현재까지 부족하다. 따라서 본 연구에서는 컨디셔닝 된 흙의 특성을 파악하기 위해 실내 가압 베인시험 장치를 고안하였다. 고안된 장치를 통해 폼에 의해 컨디셔닝 된 흙에 대하여 전단속도를 달리하며 시험을 수행하였으며, 시험은 개별요소법(DEM, discrete element method)을 통해 모델링 되었다. 시험결과와 해석결과와의 비교를 통해 개별요소법에서의 입자 접촉조건을 결정하였으며, 이는 개별요소법을 사용한 TBM 굴진해석 모델에서 쏘일 컨디셔닝을 재현할 때 가압 베인시험과 개별요소법 모델의 적용 가능성을 보여준다.

Keywords : Discrete element method, EPB shield, Foam, Soil conditioning, TBM, Vane shear test

Received 19 Nov. 2020, Revised 7 Dec. 2020, Accepted 9 Dec. 2020

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0437; Fax: +82-31-910-0565

E-mail address: chlee@kict.re.kr (C. Lee)

1. 서론

토압식(EPB, earth pressure balance) 실드 TBM(Tunnel Boring Machine) 공법은 현재 가장 널리 사용되는 터널 기계화 공법 중 하나이며, 굴착한 흙에 압력을 가해 굴진면 전방의 토압과 수압에 대응하며 지반을 굴착해 나아가는 원리를 기본으로 하는 공법이다. 토압식 실드 TBM을 운전할 때 지반을 굴착함으로써 발생하는 굴착토는 굴진면 전방을 효과적으로 지보하기에 적합하지 않은 물성을 가지고 있다. 따라서 토압식 실드 TBM 공법에서는 다양한 첨가제(additives)를 주입하여 굴착토의 역학적, 수리학적 물성을 개선하게 되는데 이를 쏘일 컨디셔닝(soil conditioning)이라 한다. 쏘일 컨디셔닝에 사용되는 첨가제는 대표적으로 폼(foam), 폴리머(polymer), 벤토나이트 슬러리(bentonite slurry) 등이 있으며, 지반 조건에 따라 다양하게 조합하여 사용된다. 일반적으로 TBM 굴진 중 첨가제를 투입할 경우 굴착토의 전단강도 감소, 마모성 감소, 컨시스턴시(consistency) 또는 워커빌리티(workability)의 증가, 투수계수 감소 등의 역학적 또는 수리학적 물성 개량효과를 얻을 수 있다. 첨가제 투입에 의해 개량된 굴착토의 물성은 TBM 굴진면 안정성을 증진시킬 뿐만 아니라 흙에 의한 기계의 토크, 추력, 마모 등을 효과적으로 줄여 TBM의 시공성을 크게 향상시킨다. 이와 같이 TBM 굴진 성능을 크게 향상시킨다는 관점에서 토압식 실드 TBM 굴진 시 쏘일 컨디셔닝 기법의 적용은 필수적이다.

일반적인 지반 재료와는 달리 첨가제-흙 혼합물의 경우 흙, 물, 공기, 첨가제로 구성되어 있으며, 압력, 시간, 간극수의 특성 등에 큰 영향을 받는다는 특징을 가지고 있어 컨디셔닝 된 굴착토의 명확한 거동을 규명하기는 어렵다. 따라서 TBM 현장에서는 컨디셔닝 된 굴착토의 물성을 파악하기 위해 토크 등의 TBM 굴진 데이터나 스크류 컨베이어를 통해 배토되는 굴착토의 슬럼프(slump) 값을 측정함으로써 그 물성을 경험적으로 파악하고 있다. 실내에서는 현장과 마찬가지로 슬럼프 시험을 통해 컨디셔닝에 따른 굴착토의 거동을 파악하는 연구가 현재까지 가장 많이 수행되었다(Peila et al., 2009; 2013; Vinai et al., 2008). 컨디셔닝 된 굴착토의 전단강도가 큰 경우, 직접전단시험이나 삼축압축시험 등으로 그 거동을 파악하는 경우도 있으나, 대부분의 굴착토의 경우 전단강도가 매우 작고 유동학적 특성을 가지므로 일반적으로 유동계(rheometer)를 통해 그 거동을 분석하게 된다. 유동계는 회전하는 물체의

형상에 따라 콘(cone), 판, 원통, 공 형태 등이 일반적으로 사용된다. Galli(2016)의 경우 공 형태의 유동계로 컨디셔닝 된 흙에 대한 실내시험을 수행하여 컨디셔닝 된 흙의 유동학적 거동을 파악하는 연구를 수행하였으며, 첨가제-흙 혼합물의 전단응력은 전단속도에 큰 영향을 받지 않고 투입되는 폼의 양이 많아질수록 전단응력이 작아진다는 결과를 도출하였다. 지반공학에서 가장 많이 적용되는 베인(vane) 형상의 유동계 또한 흙의 유동학적 특성 규명에 사용되었는데, Karmaka and Kyshwaha(2007)은 높이 14cm, 폭 5cm의 베인을 사용하여 롬(loam) 시료에 대한 실내시험을 수행하였다. 롬의 함수비 및 구속응력에 따라 시험 결과를 빙햄모델(Bingham model)에 적용하여 각 조건에 따른 점성과 항복응력을 도출하였다. Messerklinger et al.(2011)의 경우 소형 실내 가압 베인 장비를 고안하였으며, 최초로 컨디셔닝 된 흙에 대하여 실내 베인시험을 수행하였다. 특히 폼과 폴리머로 컨디셔닝 처리한 일라이트나 카올리나이트에 대한 베인 시험을 통해 컨디셔닝 된 흙의 전단특성을 규명하였다.

한편으로는 TBM의 경우 굴착조건에 따라 커터헤드의 회전속도와, 굴진속도가 장비 사양(직경, 배토량, 최대토크, 최대추력 등)에 맞추어 운영되고 있으며 이를 일련의 수치해석 기법을 통해 효율적으로 모사할 경우 지반조건에 따른 장비의 굴착 성능을 사전에 파악할 수 있는 효과적인 방법으로 사용될 수 있다. 현재까지 가장 적합하다고 판단되는 수치해석법은 개별요소법(DEM, discrete element method)으로써 TBM의 장비-흙 사이의 동적인 굴착거동을 실제와 가장 근접하게 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이때, 개별요소법을 통한 TBM 굴진해석에서 쏘일 컨디셔닝에 의한 영향을 파악하기 위해서는 컨디셔닝 된 흙 재료의 수치해석적인 재현이 선행되어야 한다. 개별요소법을 활용한 컨디셔닝 된 흙의 거동을 모사한 연구는 국내에는 전무하나, 국외의 경우 슬럼프 시험을 개별요소법을 통해 모사하여 컨디셔닝 된 흙의 거동을 모사하는 연구가 수행된 것으로 확인되었다(Wu and Qu, 2009). 개별요소법에 의한 슬럼프 시험 모사는 콘크리트 공학에서 연구가 시작되었으며, EDEM, PFC3D 등 여러 상용 개별요소법 해석 프로그램을 사용하여 다양한 조건에서 연구되어 온 것으로 보고되고 있다(Mechtcherine and Shyshko, 2015). 이중 개별요소법을 활용한 컨디셔닝 된 흙의 거동에 대한 연구는 Qu et al.(2019)의 연구결과가 대표적이다. 해당 연구는 본 연구의 목적과 가장 근접한 연구로써, 입자의 마

찰계수(μ , friction coefficient)를 변화시켜 가며 슬럼프 값을 도출하고 굴착토의 컨디셔닝 정도를 가정하여 최종적으로는 개별요소법을 적용한 TBM 굴진해석을 수행하였다. 그러나 해당 연구는 가장 널리 사용되거나 시험 조건에 따라 오차가 크게 발생하는 슬럼프 시험을 기반으로 하였으며, 입자의 마찰계수만을 고려하여 컨디셔닝의 영향을 지나치게 단순화시켰다는 큰 한계를 가지고 있다. 이와 같이 수치해석 기법을 통해 TBM의 굴진을 모델링 할 때에도 쓰일 컨디셔닝을 고려하여 모델링을 수행하는 것이 합리적이지만, 현재까지 첨가제의 투입을 고려한 TBM 굴진을 모사하는 수치해석 기법에 대한 연구는 전술한 바와 같이 국내는 물론 국외에서도 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 TBM에서 전방의 흙에 대한 컨디셔닝을 개별요소법을 활용한 TBM 굴진해석 모델에 적용하기 위한 선행연구로써, 폼 컨디셔닝 된 흙의 물성을 실내에서 파악할 수 있도록 실내 가압 베인시험 장치를 고안하였다. 이를 통해 폼에 의해 컨디셔닝이 된 흙의 유동학적(rheological) 거동을 베인의 전단속도를 변경해가며 수행한 실내 가압 베인시험을 통해 확인하였다. 마지막으로 수행한 실내 가압 베인시험을 개별요소법 상용프로그램인 PFC3D를 통해 모사하여 입자의 접촉물성을 도출함으로써 향후 개별요소법을 활용한 TBM 굴진 모델에 실험 및 해석결과의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 실내 가압 베인시험

2.1 실내시험 장비

2.1.1 폼 발생장치

폼에 의해 컨디셔닝 된 흙의 물성을 평가하기 위해서는 폼-흙 혼합물 시료조성을 위해 폼을 발생시킬 수 있는 폼 발생장치가 필요하다. 일반적으로 폼은 일정 비율로 희석된 폼제와 공기가 구슬, 메쉬 등의 공극 물질로 충전된 실린더를 통과하며 생성되는 난류를 통해 발생된다. 폼의 경우 다음에서 설명하는 대표적인 폼 주입 변수(foam injection parameter)를 통해 폼의 질과 양을 결정하여 투입한다(EFNARC, 2005).

FIR (Foam Injection Ratio)은 굴착 예정 흙의 부피(V_{es})에 대해 주입되는 폼의 부피(V_f) 비를 나타낸다. 즉, FIR 이 커질수록 굴착되는 흙 부피 대비 주입되는 폼의 부피가 커지게 된다. FIR 값은 지반조건에 따라 30~80%의 값으로

주입하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있으며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FIR = \frac{V_f}{V_{es}} \times 100\% = \frac{V_l + V_a}{V_{es}} \times 100\% \quad (1)$$

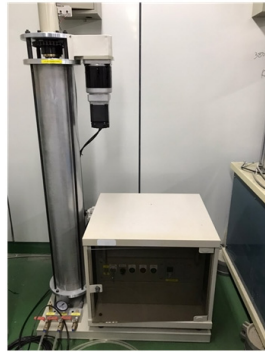
여기서, FIR 은 폼 주입비, V_f 는 폼의 부피, V_l 는 희석된 폼제 용액의 부피, V_a 는 공기의 부피, V_{es} 는 굴착 예정 흙의 부피를 말한다. FER (Foam Expansion Ratio)은 초기 액체 상태 폼제의 부피(V_l)에 비해 주입되는 공기의 부피(V_a)로 인해 폼이 팽창하는 비율로써 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. FER 이 커질수록 폼제에서 공기의 비율이 높아지며, 부피가 크고 더욱 건조한 폼이 생성된다. 일반적인 FER 값은 5~30 범위의 값을 가진다.

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

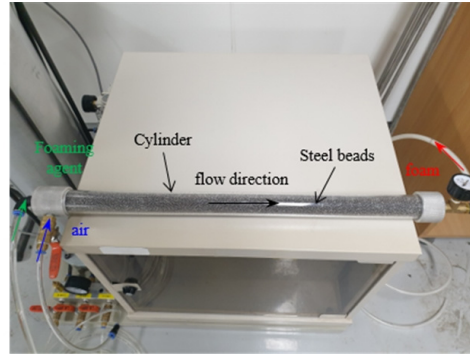
여기서, FER 은 폼 주입비, V_f 는 폼의 부피, V_l 는 희석된 폼제 용액의 부피, V_a 는 공기의 부피를 말한다. 마지막으로 농축계수(C_f , surfactant concentration)는 물에 희석된 폼제(기포제, 계면활성제)의 농도를 의미하며, 물(V_w)과 함께 폼제(V_{sf} , foaming agent)를 일정 비율로 혼합하여 물에 희석된 폼제 용액을 제작한다. C_f 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_f = \frac{V_{sf}}{V_{sf} + V_w} \times 100\% = \frac{V_{sf}}{V_l} \times 100\% \quad (3)$$

여기서, C_f 는 농축계수(surfactant concentration), V_{sf} 는 폼제의 부피, V_w 는 물의 부피, V_l 는 희석된 폼제 용액의 부피를 말한다. 본 연구에서 폼제는 특정 C_f 로 물에 희석하여 피스톤 형식으로 제작된 컨테이너를 통해 폼제 용액을 공급하였다. 폼제 용액의 공급을 위한 컨테이너가 Fig. 1(a)에 나타나 있다. 해당 장비는 피스톤 형식으로 주입량에 따라 상부에서 피스톤이 하강하는 방식으로 설계되어 있어 용액 출구 압력에 상관없이 일정 부피의 용액이 정량으로 공급될 수 있다. 또한 폼제 컨테이너에는 일정 부피의 공기를 공급할 수 있도록 유량을 서보컨트롤(servo-control)할 수 있는 공기유량계가 부착되어 있어 일정한 유량의 공기를 폼제 용액과 함께 동시 공급할 수 있다. 입력된 유량

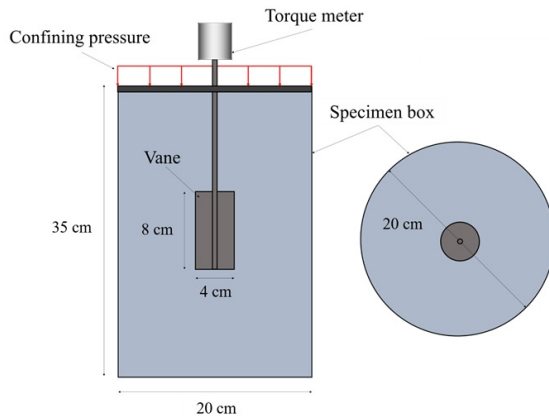


(a) Foaming agent container



(b) Foam generator

Fig. 1. Photograph of foaming agent container and foam generator



(a) Schematic of laboratory pressurized vane shear test apparatus



(b) Photograph of laboratory pressurized vane test apparatus

Fig. 2. Laboratory pressurized vane test apparatus

의 공기와 함께 폼제 용액이 쇠구슬로 충전된 실린더를 통과하면 일정 *FER*을 가진 폼제가 생성될 수 있도록 하였다. 폼제 발생을 위한 실린더는 길이 30cm, 내경 3cm의 크기로, 직경 2mm와 3mm의 쇠구슬을 1:1 질량비로 실린더 내부를 충전하여 제작하였다. 폼제 발생장치의 모습이 Fig. 1(b)에 나타나 있다. 폼제 컨테이너와 폼 발생장치를 통해 시험 몰드의 부피에 해당하는 비율의 흙과 폼의 *FIR*을 산정하고 흙과 교반시켜 폼-흙 혼합물 시료를 가압 베인시험 시료박스에 조성한다.

2.1.2 가압 베인시험 장치

서론에서 언급한 것과 같이 폼 컨디셔닝 된 흙의 유동학적 특성 관련 연구는 다양한 연구자들이 독자적으로 개발한 시험장치(전단시험 장비 또는 유동계)를 사용해 왔던 것이 일반적이었다. 이 중 가장 간편하게 시험이 가능한 슬럼프 시험은 컨디셔닝 된 굴착토의 물성, 특히 워커빌리

티를 파악하기 위해 현장과 실험실에서 가장 널리 사용되어왔다. 그러나 슬럼프 시험은 TBM 챔버 내부의 압력상태를 모사할 수 없고, 시료를 조성하는 방법, 시험 수행자에 의해 도출되는 슬럼프 값이 크게 달라진다는 단점을 가지고 있다. 따라서 TBM 챔버 내부의 압력상태를 모사하고 실험자에 의한 인위적인 영향을 배제하기 위하여 실내 가압 베인시험 장치를 제작하였다. 본 연구에서 고안한 시험장치의 개요도는 Fig. 2(a)에 나타나 있으며, 시험장치의 전경은 Fig. 2(b)에 나타나 있다.

해당 장비는 폼과 함께 배합된 흙 시료를 시료 몰드에 넣고 상부의 커버를 통해 압력을 가하는 방식으로 토압식 TBM 챔버 내부의 압력상태를 구현하고자 하였다. 압력은 시료 몰드 상부를 상판으로 압축시킴으로써 발휘되도록 하였으며 500kPa 까지의 구속 압력상태 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 몰드 내부 압력은 상부 압력계와 하부 토압계를 통해 확인할 수 있도록 하였다. 시험에 사용된 베

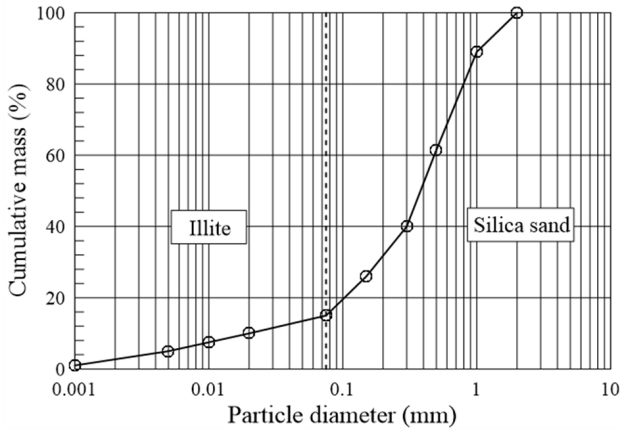


Fig. 3. Particle size distribution of soil specimen

인은 가로 4cm, 높이 8cm 크기이며, 4개의 날개를 가지고 있다. 베인의 크기에 따라 원통형 시료 몰드의 직경은 베인날개 직경의 5배인 20cm, 높이는 35cm로 제작하였다 (ASTM D4648M-16, 2016). 시험은 초기 입력된 베인 회전속도를 유지하며 토크를 측정하며 설정한 시간 동안 시험할 수 있도록 하였다.

2.2 시험조건 및 수행

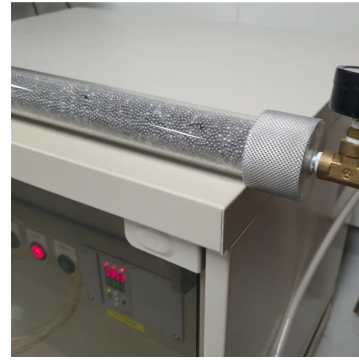
2.2.1 흙 시료 및 폼제

시료는 Fig. 3과 같은 입도분포를 가진 사질토를 사용하였다. 사질토 시료는 Maidl(1995), Langmaack(2000) 등이 제안한 토압식 쉘드 TBM이 적용 가능한 입도 범위 내에 포함되는 인공 사질토 지반을 대상으로 하였다. 이를 위해 85%의 인공규사와 15%의 일라이트로 구성된 인공 사질토를 사용하였으며 인공규사의 경우 조립분율, 일라이트의 경우 세립분율을 대표하는 것으로 조성하였다. 해당 시료의 통일분류법(USCS)에 따른 흙의 분류는 SM이며, 액성한계(LL)는 11.7%, 소성지수(PI)는 0으로 비소성(NP)이다. 또한, 폼 컨디셔닝 된 흙의 거동에 큰 영향을 미치는 함수비의 경우 10%로 설정하여 시료를 조성하였다.

본 연구에서 적용한 폼제(기포제 또는 계면활성제)는 국내 토압식 TBM 현장에서 상용되는 국내 제조사 A에서 제작한 A 폼제를 사용하였으며, 폼제의 기본 물성이 Table 1에 나타나 있다. 상기의 폼제를 사용하여 주어진 FIR ,

Table 1. Properties of foaming agent

Product	Apparent color	Specific gravity	Viscosity (cP)	pH	Half-life time (min)
foaming agent A	bright brown	1.0 - 1.1	Max, 70	8 - 11	110



(a) Foaming agent and air flow inside of foam generator



(b) Generated foam

Fig. 4. Generation of foam using foam generator

FER , C_f 값을 만족하도록 제작한 폼 발생기를 통해 폼을 생성시켜 사용하였다.

2.2.2 시험조건 결정 및 시험수행

쏘일 컨디셔닝을 위해 첨가제로 폼을 사용할 경우 폼 주입 변수를 조절하여 폼을 투입하게 된다. 폼 주입 변수의 경우 FIR , FER , C_f 의 순서로 컨디셔닝 된 흙 물성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 특정 지반조건에서 최적의 폼 주입 변수를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 사질토 시료의 경우 $FIR = 50\%$, $FER = 15$, $C_f = 3\%$ 조건에서 최적의 컨디셔닝 효과를 가지는 것으로 연구된 바 있으므로(Lee et al., 2019), 해당 폼 주입 변수를 기본 폼 주입 조건으로 하여 베인 시험을 수행하였다. $FIR = 50\%$, $FER = 15$, $C_f = 3\%$ 조건에서 폼 발생기 내부의 난류로부터 생성되는 폼(Fig. 4(a))과 생성된 폼의 모습(Fig.4(b))이 Fig. 4에 나타나 있다.



Fig. 5. Preparation of foam-soil mixture before test

준비된 흙 시료는 폼과 함께 손으로 교반 후 Fig. 5와 같이 시료박스에 조성되었다. 압력상태는 임의 토사지반의 심도 20m 지점을 굴착하며 발생하는 TBM 챔버 내부의 압력(챔버압)을 정지토압 수준인 200kPa로 가정(심도 20m, 단위중량: 20kN/m³, 정지토압계수: 0.5)하여 상판을 통해 200kPa의 구속압이 조성된 시료 상부에 가해질 수 있도록 하였다. 시험 준비가 완료된 후 베인의 회전속도를 1/30, 1/24, 1/20rpm(각각 12°, 15°, 18°/min)으로 변경해가며 동일한 조건의 시료를 각각 3회 조성하여 총 시험을 3회 수행하였으며, 시험은 베인의 1회전(360°)이 완료될 때까지 토크가 측정되는 것으로 수행되었다. 본 연구에서 수행한 실내 가압 베인시험의 시험 조건이 Table 2에 정리되어 있다.

2.2.3 시험결과

본 연구에서는 폼 컨디셔닝 된 흙이 빙협유체로 거동하

는 것을 가정하여 항복응력과 점성을 산정하고자 하였다. 빙협유체는 항복응력 이후 점성에 따라 선형적으로 거동하며, 빙협유체의 거동은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y + k \times \dot{\gamma} \quad (4)$$

여기서, τ 는 전단응력(kPa), τ_y 는 항복응력(kPa), k 는 점성(kPa·s), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(1/s)를 나타낸다. 측정된 토크에 따른 전단응력의 경우 측정된 최대토크 값을 통해 베인의 형상비(H/D)가 2일 때 흙의 비배수 전단강도를 구하는 식 (5)를 사용하여 구할 수 있다.

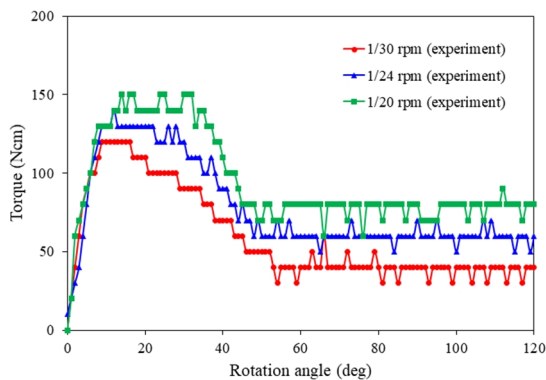
$$S_u = \frac{6M}{7D^3\pi} \quad (5)$$

여기서, S_u 는 비배수 전단강도(kPa), M 는 측정된 최대토크(Nm), D 는 베인의 직경(mm)을 나타낸다. 그러나 베인 시험에서 재료의 정확한 전단속도를 구하기 위해서는 추가적인 가정들이 필요하므로 본 연구에서는 전단속도 대신 베인 외곽 회전속도(mm/min)를 적용하여 시험결과를 나타냈다. 이에 따라 본 연구에서는 정확한 점성 값 대신 점성비례상수(kpa·min/mm)값을 도출하여 시험결과와 해석결과를 비교하였다.

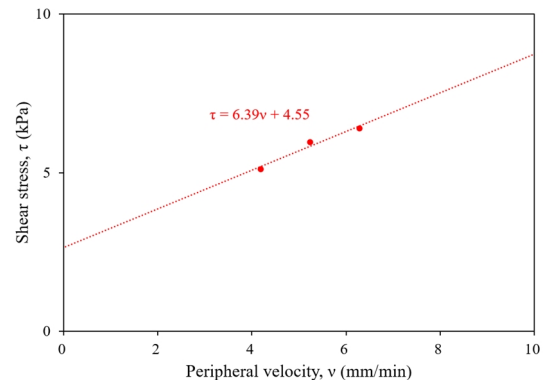
Fig. 6(a)은 베인의 회전각도에 따라 측정된 토크 값을 나타낸다. 시험결과 최대 토크 값을 나타낸 후 측정되는 토크 값이 감소하는 경향을 나타냈으며, 일정한 토크 값을

Table 2. Pressurized vane shear test conditions

Measurement of conditioned soil				Condition of pressurized vane shear test	
FIR (%)	FER	Cf (%)	Water content (%)	Pressure (kPa)	Rotational speed of vane (rpm)
50	15	3	10	200	1/30, 1/24, 1/20



(a) Measured torque during pressurized vane shear test



(b) Shear stress with different peripheral velocities of vane

Fig. 6. Results of laboratory pressurized vane test

나타내는 잔류 토크 값이 측정되었다. 또한, 베인의 회전 속도가 클수록 최대 토크 값과 잔류 토크 값이 크게 나타났다. Fig. 6(b)는 베인 외곽 회전속도에 따른 전단응력 값을 나타낸다. 폼 컨디셔닝 된 흡이 빙행유체라는 가정하에 식 (4)와 (5)에 따르면 본 시험 조건에서 폼-흡 시료의 항복응력은 4.55kPa, 점성비례상수는 6.39kPa·min/mm으로 산정되었다.

3. 개별요소법을 활용한 실내 가압 베인시험 수치 모델링

3.1 개별요소법

본 연구에서는 실내 가압 베인시험의 수치 모델링을 위해 상용 개별요소법 해석 프로그램인 PFC3D(ver. 6.0)를 사용하였다(Itasca, 2019). 폼에 의해 컨디셔닝 된 흡을 개별요소법으로 모사하기 위해서는 입자 접촉모델의 선정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 원지반이 지니고 있는 점착력 뿐만 아니라 투입된 폼에 의해 발생된 점착력을 모사해야 한다. 그러나 현재까지 선행연구들에 소개된 접촉모델들은 본딩모델을 기반으로 하고 있어 일정 응력조건 이상에서 본딩이 한번 파괴되면 다시 생성되지 않기 때문에 실제 지반재료의 점착력을 구현하기가 어렵다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 본 해석에서는 PFC3D에 내장되어있는 adhesive rolling resistance linear 접촉모델을 선정하여 사용하였다.

본 연구에서 사용한 adhesive rolling resistance linear 접촉모델의 원리가 Fig. 7에 나타나 있다. 해당 접촉모델은 일반적인 linear 접촉모델과 같은 선형 탄성모델을 사용하지만, 감쇠, 마찰(운동 및 구름), 점착력에 의한 거동을 추가적으로 고려할 수 있다. 특히 접촉모델의 요소 중 점착력의 경우 입자 간 인력범위(attraction range, D_0) 안에 있으면 점착력이 입자 간 최대인력(maximum attractive force, F_0)까지 선형적으로 발현되며, 입자 간 인력 범위 안에 들어오면 다시 선형으로 인력이 작용한다(Fig. 7(b)). 해당 접촉모델의 경우 응력에 의해 본딩이 파괴되면 다시 생성되지 않는 기존의 본딩 기반 접촉모델과는 차별성을 가져, 점토 또는 컨디셔닝에 의해 점착력이 존재하는 지반을 모사할 때 더욱 적합한 것으로 판단된다.

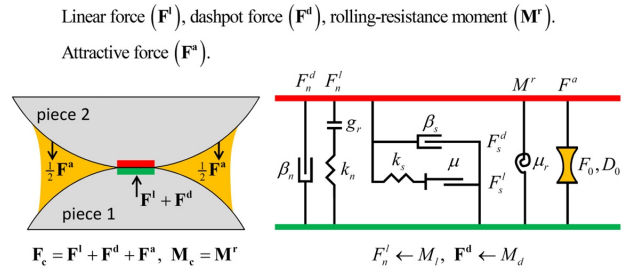


Fig. 7. Schematic of adhesive rolling resistance linear model (Itasca, 2019)

3.2 실내 가압 베인시험 수치모델

본 연구에서는 가압 베인시험 실험결과를 바탕으로 입자의 접촉물성을 검정 또는 결정하기 위해 상용 개별요소법 프로그램인 PFC3D를 사용하여 가압 베인시험 시험을 모델링 하였다. 해석 모델의 크기는 실제 실험장비의 규격과 동일하도록 지름 20cm, 높이 35cm 사이즈 원통과 내부 가로 4cm, 세로 8cm의 베인을 wall 요소로 생성하였다. 이때, 원통의 상부 wall 요소는 서보컨트롤(servo-control)을 통해 실제 시험과 동일한 200kPa의 구속압을 상부 하중을 통해 일정하게 전달할 수 있도록 하였으며, 베인의 경우 원통형 시료박스 중심을 회전축으로 하여 회전하며 시간 또는 회전각도에 따라 토크 값이 측정될 수 있도록 모델링 하였다.

ball 요소로 생성되는 입자의 경우 본 연구에서 사용된 시료의 입도분포와 동일하게 조성하는 것이 이상적이나, 생성되는 입자의 개수와 연산량이 무한히 많아지게 되어 정상적인 해석이 불가능하다. 따라서 본 해석에서는 Table 3과 같이 5가지 입자 크기를 대표로 하여 입자의 크기와 입도를 임의로 조절하였다. 입자의 밀도는 상부 구속압(200kPa)이 적용된 시험조건(폼-흡 혼합물의 밀도: 1,750

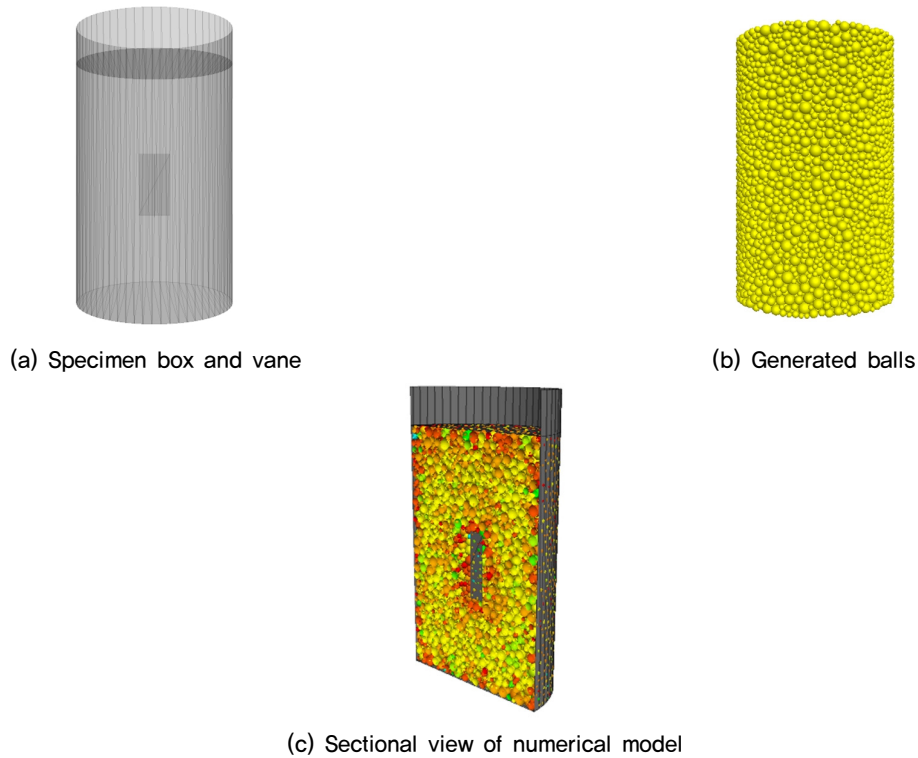


Fig. 8. Numerical model for simulating pressurized vane shear test

Table 3. Diameters and volume fractions of generated balls

Diameter (cm)	Volume fraction (%)
1.4	12.9
1.2	32.4
1.0	25.3
0.8	16.5
0.6	12.9

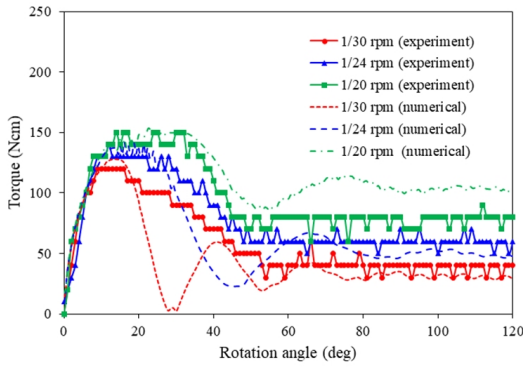
kg/m³, 간극률:0.28)이 고려될 수 있도록 2,430kg/m³으로 설정하였다. 최종적으로 생성된 입자의 개수는 약 17,760 개이며, 해석 모델은 Fig. 8에 나타나 있다. 이때, ball 요소로 재현한 폼-흙 혼합물의 경우 재료를 구성하는 폼, 물, 공기, 흙 입자 등의 구성요소가 일체 거동한다고 가정(빙햄유체)하였으므로 베인 전단 시 시간에 따라 발생 또는 소산하는 폼, 수압 등의 요소들은 고려하지 않았다.

해석 조건은 가압 베인시험 조건과 같이 베인의 회전속도는 1/30, 1/24, 1/20rpm(각각 12°, 15°, 18°/min)으로 변경해가며 수행하였으며, 해석시간은 베인이 1회 회전(360°)할 때까지 수행되었다. 해석은 각 실험의 거동과 유사한 결과가 나타날 때까지 모델의 접촉변수들을 시행착오법(trial and error)을 통해 결정하였다.

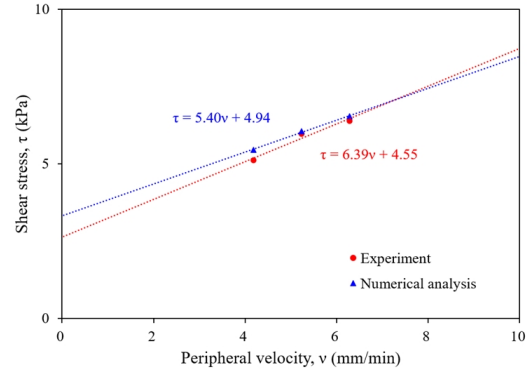
3.3 접촉변수 검정 결과

실내 가압 베인시험 결과를 바탕으로 접촉변수를 구하기 위해 개별요소법을 사용한 실내 가압베인시험 해석 모델을 통해 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 adhesive rolling resistance linear 접촉모델에서 변경할 수 있는 입자와 입자 간의 접촉변수는 수직 강성계수(normal stiffness, K_n), 전단 강성계수(shear stiffness, K_s), 마찰계수(friction coefficient, μ), 유효탄성계수(effective modulus, E^*), 구름 마찰계수(rolling friction coefficient, μ_r), 수직 임계감쇠비(normal critical damping ratio, β_n), 수평 임계감쇠비(normal critical damping ratio β_s), 입자 간 최대인력(maximum attractive force, F_a), 입자 간 인력범위(attraction range, D_0)가 있으며, 상기의 접촉변수를 변경해가며 해석을 수행하고 최종적으로 유사한 곡선을 나타내는 값으로 접촉변수를 결정하였다.

상기의 접촉변수들을 시험결과를 바탕으로 시행착오법을 통해 검정한 결과가 Fig. 9에 나타나 있으며, 그 값들이 Table 4에 정리되어 있다. Fig. 9(a)는 베인 회전각도에 따른 토크 결과를 해석 값과 함께 나타낸 결과이다. 해석결과 최대 토크와 전반적인 토크 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 토크 값이 급격히 감소하는 부분이나 잔류



(a) Measured torque during pressurized vane shear test



(b) Shear stress with different peripheral velocities of vane

Fig. 9. Calibration of contact properties by comparing test and analysis results

Table 4. Calibrated contact properties of adhesive rolling resistance linear contact model

Properties	Value
Normal stiffness, K_n (N/m)	1×10^5
Shear stiffness, K_s (N/m)	1×10^5
Friction coefficient, μ	0.01
Effective modulus, E^* (N/m ²)	1×10^7
Rolling friction coefficient, μ_r	0.01
Normal critical damping ratio, β_n	0.2
Shear critical damping ratio, β_s	0.2
Maximum attractive force, F_a (N)	1×10^{-2}
Attraction range, D_0 (m)	1×10^{-4}

토크 값이 크게 측정되는 부분이 일부분 나타났는데, 이는 입자의 상호 맞물림(interlocking)이 순간적으로 파괴 또는 생성되어 토크 값이 급격히 감소하거나 크게 증가한 것으로 사료된다. Fig. 9(b)에는 해석에 따른 베인 외곽 회전속도-전단응력 곡선이 가압 베인시험 결과와 함께 나타나 있다. 해석결과 항복응력은 5.40kPa, 점성비례상수는 4.94kPa·min/mm으로 나타났으며, Table 5에 본 연구에서 실험 및 해석으로 도출 및 교정된 폼-흙 재료의 항복응력과 점성비례상수를 비교한 결과 항복응력의 경우 약 15%, 점성비례상수의 경우 약 8.8%의 오차율을 나타냈다. 해석결과, 각 접촉변수의 값을 변경해가며 시험조건에 따라 상이한 전단속도-전단응력 거동을 나타내는 폼-흙 혼합물을 개별요소법으로 재현할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 각 접촉변수의 영향을 향후 매개변수 해석을 통해 추가적으로 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Comparison of pressurized vane test and numerical analysis results

Properties	Test results	Numerical analysis results	Error (%)
Yield stress (kPa)	6.39	5.40	15.49
Proportional factor of viscosity (kPa·min/mm)	4.54	4.94	8.81

4. 결론

본 연구는 폼 컨디셔닝 된 흙의 유동학적 물성을 실험적으로 파악하고 그 결과를 개별요소법 기반의 TBM 굴진해석에 적용하기 위해 수행되었으며, 본 논문의 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 본 연구에서는 가압 상태에서 폼에 의해 개선된 흙의 유동학적 물성을 평가하기 위해 실내 가압 베인 시험장비가 고안되었다. 실내 가압베인 시험장비는 500kPa까지의 TBM 챔버 내 압력상태를 실험실에서 재현할 수 있고, 베인 회전속도를 조절해가며 토크를 측정할 수 있어 TBM 내부 컨디셔닝 된 흙의 유동학적 특성을 확인할 수 있다.
- (2) 임의의 사질토 지반, 폼 주입 조건 및 압력을 가정하고, 베인의 회전속도를 변화시키며 베인 전단시험이 수행되었다. 본 연구에서는 폼-흙 혼합물의 유동학적 거동을 빙행유체 거동으로 가정하여 항복응력과 점성비례상수를 도출하였다.
- (3) 개별요소법 상용 해석프로그램인 PFC3D를 활용하여 실내 가압 베인시험을 모델링하였다. 시험결과와 해석결과를 비교함으로써 사용된 adhesive rolling resistance

linear 접촉모델의 입자 간 접촉변수들을 결정하였다.

- (4) 토압식 TBM 폼에 의해 개선된 흙의 경우 지반종류, FIR , FER , C_f 등의 폼 주입변수, 전단속도 등에 따라 혼합물의 유동학적 거동이 크게 달라지므로, 위와 같은 변수의 영향에 대한 연구가 추가 수행되어야 한다. 이때, TBM 굴진에 의해 TBM 내부에서 연속적인 전단이 이루어지는 굴착토의 특성상 항복응력 뿐만 아니라 잔류응력을 중점으로 그 거동을 추가 분석해야 할 것이며, 개별요소법 수치해석 또한 이를 중점으로 매개변수 해석이 향후 수행되어야 할 것으로 보인다.
- (5) 본 연구의 교정 과정에 의해 결정된 입자의 접촉변수들은 향후 개별요소법을 기반으로 한 TBM 굴진해석 모델에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 쓰일 컨디셔닝 기법의 적용에 의해 향상되는 TBM 굴진 성능을 수치해석적으로 비교·분석할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 20SCIP-C129646-04)

References

1. ASTM D4648M-16. (2016), Standard test methods for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil.
2. EFNARC, A. (2005), *Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*, Recommendation of European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures.
3. Galli, M. (2016), *Rheological characterisation of earth-pressure-balance (EPB) support medium composed of non-cohesive soils and foam*. Ph.D Thesis.
4. Itasca. (2019), *Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC3D) 6.0 documentation*, Minneapolis: Itasca Consulting Group.
5. Karmakar, S., and 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.
6. Langmaack, L. (2000), "Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling", *proceedings of North American tunneling*, 2000, pp.525-542.
7. Lee, H., Shin, D., Kim, D. Y., Shin, Y. J. and 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.
8. Maidl, U. (1995), *Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum*, Ph.D Thesis, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau. (in german)
9. Mechtcherine, V. and Shyshko, S. (2015), "Simulating the behaviour of fresh concrete with the Distinct Element Method-Deriving model parameters related to the yield stress", *Cement and Concrete Composites*, Vol.55, pp.81-90.
10. Messerklinger, S., Zumsteg, R. and Puzrin, A. M. (2011), "A new pressurized vane shear apparatus", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.34, No.2, pp.112-121.
11. Peila, D., Oggeri, C. and Borio, L. (2009), "Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling", *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol.15, No.3, pp.167-174.
12. Peila, D., Picchio, A. and Chierigato, A. (2013), "Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.35, pp.55-66.
13. Qu, T., Wang, S. and Hu, Q. (2019), "Coupled discrete element-finite difference method for analysing effects of cohesionless soil conditioning on tunneling behaviour of EPB shield", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.23, No.10, pp.4538-4552.
14. Vinai, R., Oggeri, C. and Peila, D. (2008), "Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research" *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, No.3, pp.308-317.
15. Wu, L. and Qu, F. Z. (2009), "Discrete element simulation of mechanical characteristic of conditioned sands in earth pressure balance shield tunneling", *Journal of Central South University of Technology*, Vol.16, No.6, pp.1028.