

CASE STUDY

개별요소법을 활용한 경사각에 따른 스크루 컨베이어 모델 성능 평가

박병관¹, 최순욱², 이철호^{3*}, 강태호⁴, 장수호⁵

¹과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과 박사과정 학생연구원 ²한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원, ³한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원, ⁴한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원, ⁵한국건설기술연구원 건설산업진흥본부 선임연구위원

Evaluation of Screw Conveyor Model Performance depending on the Inclined Angle by Discrete Element Method

Byungkwan Park¹, Soon-Wook Choi², Chulho Lee^{3*}, Tae-Ho Kang⁴, and Soo-Ho Chang⁵

¹Graduate Student, Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology

²Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁴Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁵Senior Research Fellow, Construction Industry Promotion Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding author: chlee@kict.re.kr

Received: November 11, 2019

Revised: November 27, 2019

Accepted: November 27, 2019

ABSTRACT

For the economical construction of a tunnel by TBM, the selection of TBM optimized with the various project conditions is important, and also necessary to predict the performances of selected TBM in advance. This study was conducted to comprehensively evaluate the performance of the EPB shield TBM screw conveyor by the discrete element method. The sticky particles were used for the excavated material models, and screw conveyor with 11 different inclined angles were simulated to evaluate the performance depending on the different inclined angles. The four different rotational speed conditions of the screw were used, and torque, required power, extra energy for muck discharge, and the muck discharge rate were selected as four performance indicators. As a result, the optimized inclined angle was selected, and selected angle accords with the fact that EPB shield TBM screw conveyor is generally installed and adjusted at the inclined angle between 20.0° and 30.0° in the field.

Keywords: EPB shield TBM, Optimized screw conveyor, Inclined angle, DEM, Performance evaluation

초록

경제적인 TBM 시공을 위해서는 현장 조건에 맞는 최적의 TBM 선정과 함께, 선정된 TBM의 굴착 성능을 예측하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 개별요소법 (Discrete Element Method, DEM) 기법에 근거한 입자 역학 전용 해석 상용 소프트웨어를 사용하여 경사각에 따른 토압식 쉴드TBM의 버력 배토 장비인 스크루 컨베이어의 각도에 따른 성능을 종합적으로 평가하였다. 굴착 토사를 모사하기 위해 점성 특성을 갖는 입자들을 사용하였으며, 스크루 컨베이어의 경사각에 따른 성능을 평가하기 위해 11 가지 스크루 컨베이어 모델을 적용하였다. 해석에는 네 가지 스크루 컨베이어 회전 속도 조건이 적용되었으며 스크루 컨베이어의 성능을 평가하기 위한 지표로 토크, 소요 동력 이외에도 배토를 위해 추가로 소요되는 작업량 및 단위 시간당 배토량을 선정하였다. 마지막으로 평가된 네 가지 성능 지표를 종합하



여 주어진 해석 조건에서의 최적의 스크루 컨베이어 경사각을 선정하였으며, 이는 실제 TBM 현장에서 많이 사용되는 스크루 컨베이어 경사인 $20.0^{\circ} \sim 30.0^{\circ}$ 범위와도 부합하는 것으로 파악되었다.

핵심어: 토압식 쉴드TBM, 최적의 스크루 컨베이어, 경사각, 개별요소법, 성능 평가

1. 서론

토압식 쉴드TBM공법(earth pressure balance shield TBM)은 커터헤드 후면에 있는 챔버에 굴착 토사를 가득 채워 토압으로부터 막장의 안정성을 유지하면서 터널을 굴착하는 TBM 공법 중 하나이다. 최근 들어 첨가재를 활용한 굴착 토사 개량 기술의 발달로 인해 기존의 연약 지반을 비롯한 다양한 지반 조건에서의 원활한 시공이 가능해졌으며, 높은 안전성과 고속시공이 필수적으로 요구되는 도심지 터널 공사에 전 세계적으로도 많이 적용되고 있다. 이러한 쉴드TBM 공법의 성공적인 적용을 위해서는 현장 여건에 맞는 최적화된 TBM 선정과 동시에 선정된 TBM의 굴진 성능을 사전에 예측하는 것이 매우 중요하다(KICT, 2015). 토압식 쉴드TBM에서 굴진과 동시에 막장의 안정성을 유지하기 위해서는 스크루 컨베이어의 배토량 관리가 기본적으로 수행되어야 한다. 일반적으로 배토량 관리는 토압 제어방식으로 이루어지는데, 토압 제어 방식이란 챔버 내에 설치된 토압계에서 측정되는 토압이 관리 토압과 동일하게 나타나도록 스크루 컨베이어의 회전수를 제어하는 방식을 의미한다(Kim et al., 2015).

토압식 쉴드TBM공법이 보편화됨에 따라 관련 핵심 기술인 스크루 컨베이어에 관한 연구도 점차 늘어나고 있으며, 대부분의 스크루 컨베이어 연구는 축소 모형실험을 통해 수행되어왔다. Talmon and Bezuijen(2002)은 균질한 점착력(cohesion)을 가지는 굴착 토사를 대상으로 굴착 토사의 운동량 수지(momentum balance) 및 운동 조건을 고려하여 스크루 컨베이어 내부에서의 굴착 토사의 흐름을 수학적 모델을 통해 예측하는 연구를 수행한 바 있다. Talmon and Bezuijen(2002)는 실내시험을 통해 점착력으로 대표되는 굴착 토사의 유동 특성(rheological properties)이 스크루 컨베이어의 단위 시간당 배토량과 스크루에 작용하는 압력을 결정하는 주요 인자임을 보고하였으며, 더 나아가 실내 모형실험과 실제 현장 데이터와의 비교를 통해 검증된 수학적 모델까지도 제안하였다. Merritt and Mair(2006)는 1:10 비율로 축소된 스크루 컨베이어 모형을 사용하여 다양한 점토를 대상으로 첨가재 주입 여부에 따른 스크루 컨베이어에 작용하는 압력, 토크, 응력 및 단위 시간당 배토량을 다각도로 평가하였다. Peila et al.(2007)는 1:10 비율로 축소된 스크루 컨베이어 모형을 사용하여 포화 사질토와 첨가재가 주입된 개량된 사질토를 대상으로 첨가재 주입 여부에 따른 스크루 컨베이어에서 측정되는 토크 값의 변화를 분석해 보았으며, 첨가재 주입으로 인해 스크루 컨베이어에 작용하는 토크 값이 약 25% 정도로 감소함을 보고하였다. 기존 선행 연구와는 다르게 Kim et al.(2011)은 동일한 굴착 토사를 대상으로 스크루 컨베이어의 제작 사양에 따른 단위 시간당 배토량을 평가하는 연구를 수행하였다. 1:45.5 비율로 축소된 스크루 컨베이어 모형을 통해 세 가지 스크루 피치 조건과 네 가지 스크루 경사각도 및 네 가지 스크루 회전속도 조건에 따른 단위 시간당 배토량을 각각 평가하였으며, 이를 통해 주어진 실험 조건에서의 최적의 스크루 컨베이어 조건까지도 제안하였다. Oh et al.(2014)는 1:10 비율로 축소된 모형을 사용하여 스크루 형태 및 스크루 각도까지 고려하여 단위 시간당 배토량을 기존 이론식과의 비교를 통해 평가하는 연구를 수행한 바 있다.

근래 들어 컴퓨터 성능의 급속한 향상으로 인해 앞서 기술한 축소 모형실험 연구와는 다른 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)에 기반한 수치해석법을 통해 스크루 컨베이어의 성능을 예측하는 연구가 시도되고 있다. Owen and Cleary(2009)는 스크루 컨베이어의 경사각 및 회전 속도뿐만 아니라 재료에 따른 스크루 컨베이어 내부의 이송량(feed)과 충전률(volumetric fill level)에 따른 스크루 컨베이어의 성능을 다각적으로 평가하는 연구를 수행하였다. 하지만 성능을 종합적으로 평가하기에는 지나치게 작은 스크루 컨베이어 모델(직경:38 mm)이 해석에 적용되었다는 점에서 한계점을 보였다. 최근 들어 Lee et al.(2017a)는 직

경 6.14 m 스포크형 토압식 쉘드TBM에 대한 굴진 성능을 종합적으로 평가하는 과정에서 스크루 컨베이어 토크와 단위 시간당 배토량을 두 가지 회전속도(15 RPM, 20 RPM)에 따라 평가한 바 있다. 더 나아가 Lee et al.(2017b)는 직경 6.64m 면판형 TBM에 대해 동일한 스크루 회전속도(13.5 RPM)에서의 커터헤드 회전속도(1 RPM, 2 RPM)에 따른 스크루 컨베이어 토크와 단위 시간당 배토량의 변화 양상을 평가하였다. Lee et al.(2019)은 굴착 토사가 아닌 6가지 모양으로 구성된 암반 칩 모델을 사용하여 암반 칩 형상에 따른 직경 3.54 m급 토압식 쉘드TBM의 스크루 컨베이어 성능에 관한 연구를 수행하였다. 실제 형상보다 1:2 비율로 축소된 모델이 해석에 적용되었으며, 동일한 회전속도(10 RPM)와 경사각이 없는 조건을 가진 스크루 컨베이어를 대상으로 암반 칩 형상에 따른 배토 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 DEM 기법을 활용하여 경사각 및 회전 속도에 따른 토압식 쉘드TBM에 설치된 실제 크기의 스크루 컨베이어(직경: 900 mm) 성능을 네 가지 지표를 통해 각각 평가하였으며, 도출된 지표 값을 기반으로 주어진 굴착 토사조건에서의 최적의 경사각(inclined angle)을 선정하고자 하였다. 본 해석에는 굴착 토사 모델로 점착력을 갖는 입자들이 적용되었으며, 0.0°~40.0° 사이의 서로 다른 경사각을 갖는 11가지 스크루 컨베이어 모델이 사용되었다. 스크루 컨베이어의 운동 조건으로 네 가지 회전속도(5, 10, 15, 20 RPM)가 부여되었으며, 스크루 컨베이어의 성능 평가를 위한 지표로는 토크, 소요 동력, 배토를 위해 추가로 소요되는 작업량 및 단위 시간당 배토량을 선정하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 굴착 토사 모델

일반적으로 토압식 쉘드TBM공법은 투수성이 낮은 점성토로 구성된 연약 지반에 많이 적용된다. 따라서, 본 연구에서는 점착성을 갖는 다수의 입자를 사용하여 굴착 토사를 모델링하기 위해 EDEM(2019)이 다양한 문헌연구와 사전 검정(calibration) 해석을 통해 자체적으로 보유하고 있는 ‘Soils Starter Pack’을 활용하였다. 굴착 토사를 구성하는 토립자는 18mm 단일 구형의 입자 세 개를 결합하여 모델링하였으며, 토립자 사이의 점착력을 모사하기 위해 Edinburgh Elasto-Plastic-Adhesion(EEPA) 접촉 모델이 사용되었다. EEPA 접촉 모델은 이력현상에 기반한 점착성 입자의 핵심적인 거동을 모사하기 위해 Jones(2003)과 Jones et al.(2004)의 연구에 기반하여 개발되었으며, EEPA 접촉 모델에서 점착성 고체의 유동 거동 특성은 입자가 과거에 경험한 1차 응력(prior consolidation stress)에 따라 크게 좌우된다. EEPA 접촉 모델은 크게 탄소성접촉 변형을 설명하기 위한 선형 hysteretic spring 접촉 모델과 소성 접촉 변형을 모사하기 위한 점착력 성분으로 구성되어 있다(Thakur et al., 2014). 본 연구에서 사용된 입자 형태와 물성값은 Fig. 1과 Table 1에 정리하였다.

일반적으로 안식각은 물체가 사면 위에 머무를 수 있는 최대 경사각을 뜻하며, 특정 입자들의 안식각은 입자 사이의 상호마찰과 부착력에 의해 좌우된다. 특정 입자들의 안식각은 스크루 컨베이어의 굴착 토사 이송 시, 컨베이어 내부에서의 충만률과 그에 따른 이송량과 밀접한 관련이 있기 때문에 스크루 컨베이어의 설계 시 고려 요인으로 알려져 있다. 모델링한 굴착 토사의 안식각을 측정하기 위해 간단한 시험 모사를 통해 수행하였으며, 안식각은 약 45.0°~50.0° 사이의 범위로 측정되었다(Fig. 2). 이는 ‘Carr classification’에서 제시한 안식각에 따른 점착성 입자 기준에도 부합한다(Al-Hashemi and Al-Amoudi, 2018).

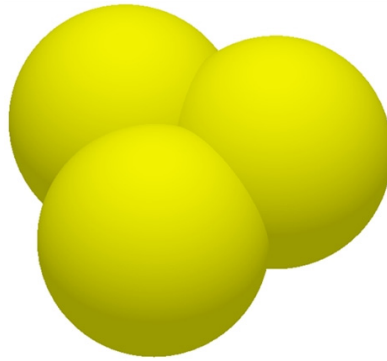


Fig. 1. Numerical model of particle

Table 1. DEM parameters for excavated materials

Property	Description
Particle shape	Trigonal
Particle density (kg/m ³)	2,500
Poisson's ratio	0.25
Shear modulus (MPa)	500
Single sphere radius (m)	0.018
Particle mass (kg)	0.179
Particle volume (m ³)	6.891×10 ⁻⁵
Coefficient of restitution	0.50
Coefficient of static friction	0.50
Coefficient of rolling friction	0.01
Contact model	Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model

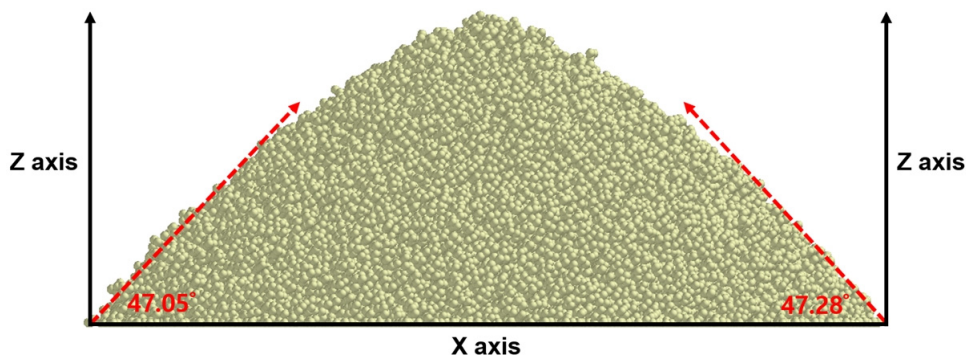


Fig. 2. Numerical result of angle of repose test

2.2 스크루 컨베이어 모델

스크루 컨베이어에 사용되는 스크루 형태는 크게 샤프트 타입과 샤프트가 없는 타입으로 분류가 가능하며, 스크루 형태는 반출 가능한 버력의 크기, 지반 조건, 지하수의 등을 종합적으로 고려하여 선정된다(Kim et al., 2011; Oh et al., 2014). 본 연구에는 실

제 직경 7.73 m 토압식 쉴드TBM에 장착되어있던 지름 900 mm 샤프트 타입 스크루 컨베이어 모델을 그대로 적용하였으며, TBM 전면부의 커터헤드영역의 모델링 작업은 해석의 편의를 위해 생략하였다. 실제 TBM의 쉴드 및 스크루 컨베이어 길이는 각각 8,500 mm, 9,000 mm이다. 본 연구의 목표는 경사각에 따른 스크루 컨베이어의 성능을 종합적으로 평가하여 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 경사각을 산정하는 것이다. 길이 외에 나머지 스크루 컨베이어의 제원은 동일하기 때문에 해석을 통해 산정되는 수치보다는 각각의 조건에서 산정된 수치들의 상대적인 비교를 통해 평가하였다. 결과적으로 본 연구에서는 전체적인 해석 시간 단축을 위해 쉴드 및 컨베이어 길이만 각각 2,125 mm와 2,500 mm로 축소시켜 모델링 작업을 수행하였다(Fig. 3(a)).

일반적으로 토압식 쉴드TBM에 적용되는 스크루 컨베이어 경사각은 20.0°와 30.0° 사이에서 조정된다(Oh et al., 2014). 본 연구에서는 경사각에 따른 최적의 스크루 컨베이어를 선정해보기 위해 경사각이 서로 다른 11개의 스크루 컨베이어를 모델링하였다. 경사각 45.0° 이상을 갖는 스크루 컨베이어는 수직형으로 분류되어 설계 시 패턴 및 형상이 일반적으로 사용되는 스크루 컨베이어 모델과 조금씩 달라질 수 있기 때문에(KWS manufacturing company, 2019), 본 연구에서 사용된 스크루 컨베이어의 경사각 조건은 0.0°부터 40.0° 이하까지 기본 5.0° 간격으로 설정되었다. 또한, 세부적인 스크루 컨베이어 성능 평가를 위해, 시공 시 자주 사용되는 경사각 범위 구간으로 알려진 20.0°와 30.0° 사이에는 2.5° 간격 조건을 추가적으로 부여하였다. 그 외의 챔버 길이는 700 mm, 스크루 컨베이어의 직경은 900 mm, 샤프트의 직경은 100 mm, 피치 간격은 770 mm로 실제 도면과 유사한 제원을 사용하였다(Fig. 3(b)). 입자와 스크루 컨베이어 모형 사이의 접촉 물성은 입자 사이 물성과 동일하게 Table 1에 제시된 세 가지 계수(coefficient of restitution, coefficient of static friction, coefficient of rolling friction)를 적용하였다.

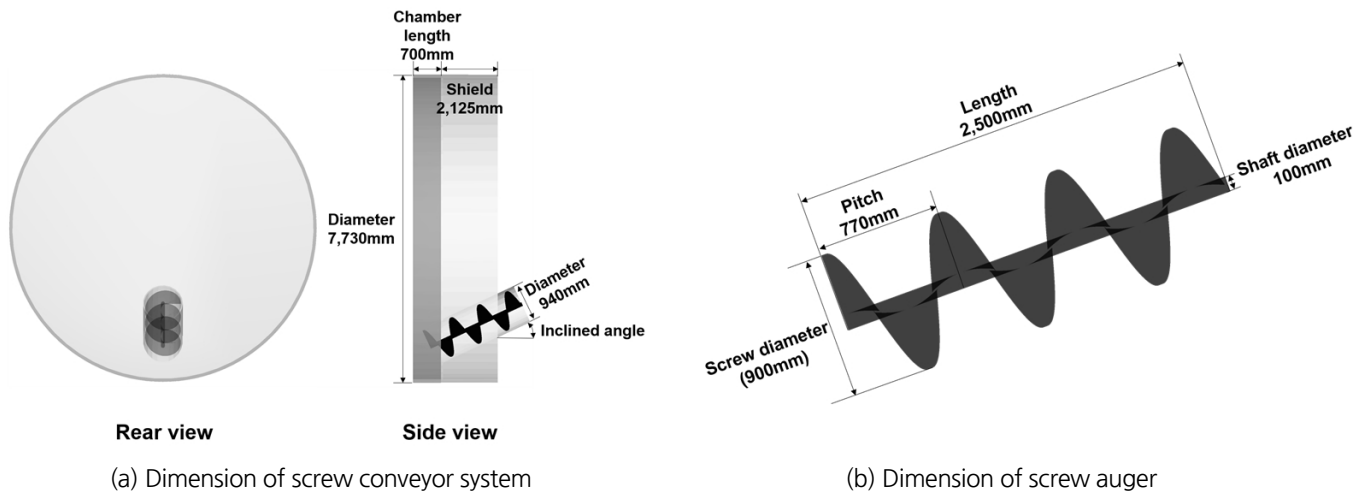


Fig. 3. Numerical model of screw conveyor systems

스크루 컨베이어 해석에는 약 191,407개의 입자가 사용되었으며, 전체 해석 시간은 약 120초로 설정되었다. 먼저 실제 토압식 쉴드TBM 도면을 바탕으로 커터헤드를 제외한 쉴드, 챔버 및 스크루 컨베이어 형상을 3D 카드 소프트웨어를 통해 작성하였다. 다음으로 구현된 3D 형상을 해석 상용 소프트웨어로 가져오는 작업을 수행하였으며, 이와 함께 스크루 컨베이어 시뮬레이션을 위한 기본적인 준비 작업을 진행하였다. 마지막으로 선정된 입자 모양과 물성값을 바탕으로 챔버 내에 입자를 임의적으로 생성하였으며 생성된 입자들의 안정화되는 시간을 거친 후에 시뮬레이션을 개시하고, 스크루 컨베이어 내부로 입자가 채워진 후부터 데이터 기록을 진행하였다. 실제 토압식 쉴드TBM 굴진에서 막장 안정제어는 챔버내에 들어오는 굴착 토사량과 스크루 컨베이어의 배토

량을 균형있게 조절하면서 이루어지게 된다(Kim et al., 2015). 따라서 실제 TBM 굴진을 현실성 있게 모사하기 위해서는 스크루 컨베이어를 통해 배출되는 입자 수 만큼 챔버내의 입자수가 채워져야한다. 하지만 본 해석에서는 최초 일정하게 채워진 챔버내 입자에 대해서만 한정하여 해석을 수행하여 챔버압이 해석이 진행됨에 따라 감소하게 된다.

스크루 컨베이어의 배토량은 스크루 컨베이어의 회전수에 비례한다. 하지만 원활한 배토능력을 확보하기 위해 회전수를 적정값 이상으로 증가시키게 되면 회전수에 비례하여 이상 마모가 발생하여 기계 손상의 원인이 될 수도 있다(Kim et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 스크루 컨베이어 회전 속도의 상한값을 20 RPM으로 선정하였으며, 회전 속도에 따른 스크루 컨베이어의 성능까지도 평가해보기 위해 네 가지 회전 속도 조건(5, 10, 15, 20 RPM)을 각각 해석에 적용하였다. 해석 시간은 총 120초로 설정하였다. Fig. 4는 안정화 시간을 거친 후의 경사각 20.0° 를 갖는 스크루 컨베이어 모델의 시뮬레이션 시작 직전의 모습을 보여주며, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 측면 및 후방에서 바라본 모습을 나타낸다.

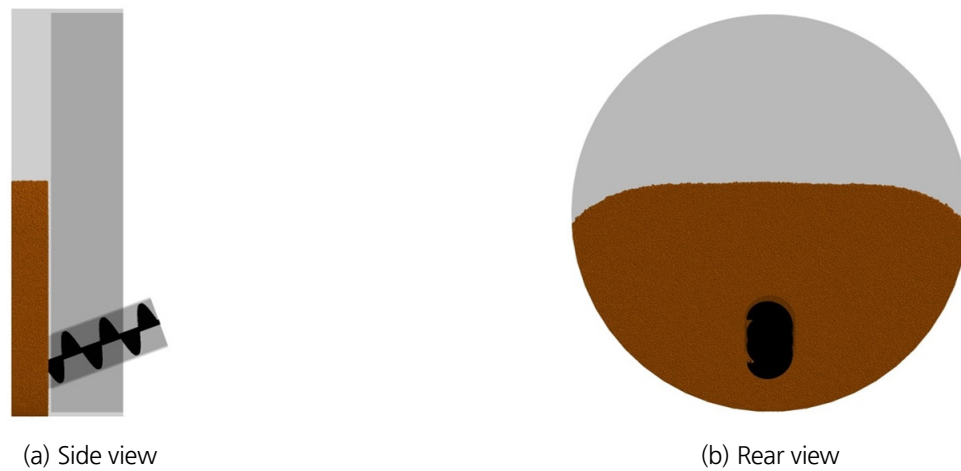


Fig. 4. Numerical model of screw conveyor simulation (Inclined angle: 20.0°)

2.3 분석 방법

스크루 컨베이어의 경사각 및 회전 속도에 따른 스크루 컨베이어 성능은 사전에 선정된 네 가지 성능 지표(토크, 소요 동력, 배토를 위해 추가적으로 소요되는 작업량 및 단위 시간당 배토량)를 통해 각각 평가하였다. 본 연구에서 스크루 컨베이어에 작용하는 토크는 입자와 스크루 컨베이어 사이의 접선 방향 접촉력과 스크루 컨베이어 회전축으로부터 접점까지의 수직 거리 곱으로 계산되며, 접선 방향 접촉력은 입자와 스크루 컨베이어 사이의 접선 방향의 중첩으로부터 계산된다(Fig. 5) (EDEM, 2019). 스크루 컨베이어의 구동에 필요한 소요 동력은 산정된 토크와 스크루 컨베이어 회전수(rad/sec)의 곱으로 산정하였다.

경사각에 따른 배토 과정에 추가로 소요되는 작업량을 간접적으로 평가하기 위해 실제 직경 7.73 m 토압식 쉘드 TBM 후방부에 컨베이어 벨트가 바닥 면으로부터 약 3.3 m 높이에 수평으로 설치되어 있다고 가정하였다(Fig. 6). 후방설비인 컨베이어 벨트에 관한 구체적인 제원 정보가 없는 관계로, 스크루 컨베이어의 높이를 산정하기 위해 실제 TBM 제작사가 제작한 토압식 쉘드 TBM 제원을 참고하여 TBM 직경 대비 컨베이어 높이의 비율을 추정하는 방법을 활용하였다. 스크루 컨베이어의 경사각에 따라 달라지는 스크루 컨베이어의 배출부 높이와 컨베이어 벨트의 높이를 동시에 고려하였으며, 배출부의 높이가 컨베이어 벨트의 높이보다 낮은 경사각을 가진 스크루 컨베이어는 배토를 위한 추가적인 작업이 필요한 경우로 평가하고 이 때 소요되는 에너지량이 많을수록 낮은

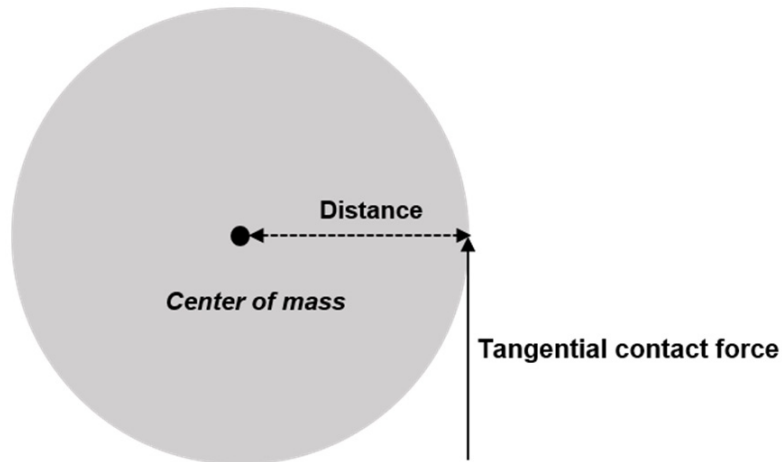


Fig. 5. Definition of torque on the particle and geometry (after EDEM, 2019)

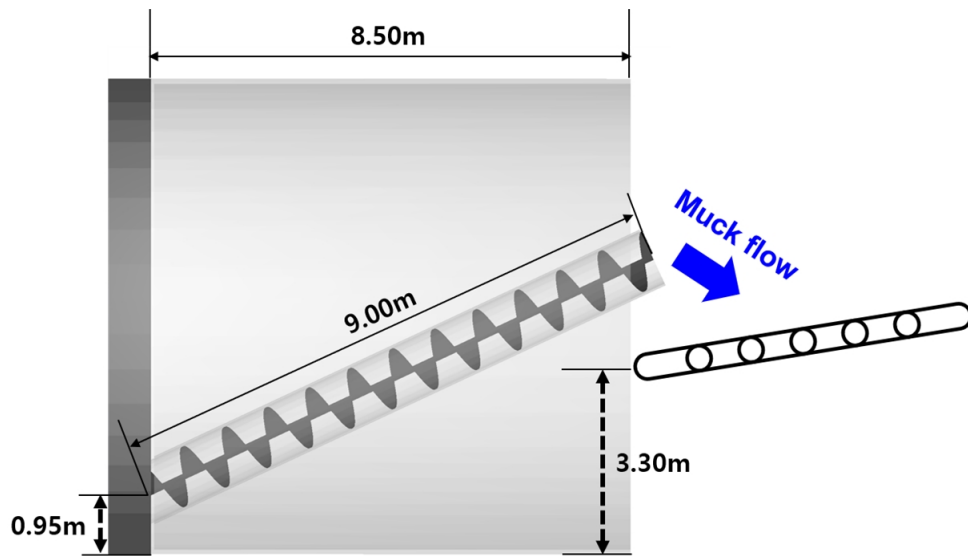


Fig. 6. Concept for evaluation of the necessity of muck discharge extra work

평가 등급을 부여하였다.

단위 시간당 배토량(kg/sec)은 특정 구역에서 측정된 단위 시간당 입자의 평균 질량흐름으로 정의하였으며, 본 연구에서는 작성된 스크루 컨베이어 구간의 중심 부분인 약 600 mm 구간을 측정 대상 구역으로 선정하였다(Fig. 7). 입자는 스크루 컨베이어 내부를 통해서만 이송되기 때문에, 단위 시간당 입자의 평균 질량흐름은 스크루 컨베이어 내부에서만 측정된다. 다만, 경사각이 증가함에 따라 측정구역의 용적이 증가될 수밖에 없기 때문에, 이에 대한 보정으로 측정된 질량흐름값을 증가한 용적 비율만큼 다시 감소시키는 후처리 계산을 수행하였다.

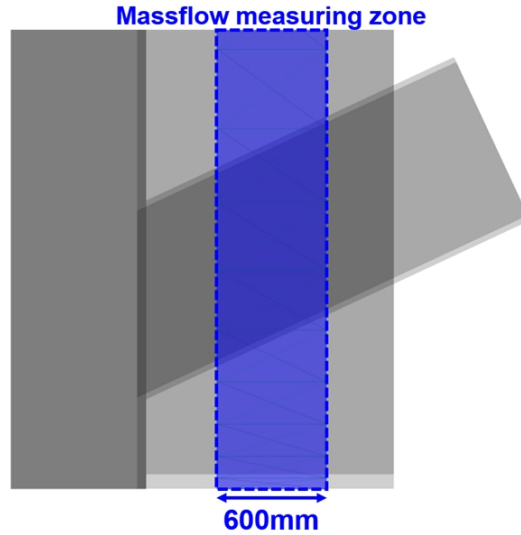


Fig. 7. Concept of measurement method for massflow rate during the simulation

본 해석의 목표는 스크루 컨베이어 성능을 각각의 지표를 통해 평가한 후, 도출된 네 가지 지표 값을 종합하여 우선 순위를 통해 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 경사각을 선정하는 것이다. 본 연구에서는 각각의 성능 지표 평가 결과값에 따라 우선 순위를 선정하였으며, 연구 초기 단계수준으로 접근하여 각 성능 지표의 가중치는 동일하게 부여하였다. 마지막으로 각 성능 지표의 순위를 종합화하여 최적의 경사각 조건을 선정하였다. 주어진 성능 지표에 대해 우선순위를 선정하는 기본 방법은 실제로 산업공학분야에서도 제품 설계 시 적용되는 방법으로 알려져있다(Mok et al., 2004; Mok et al., 2008).

3. 해석 결과 및 분석

Fig. 8은 경사각 15.0° 를 가지는 스크루 컨베이어의 회전속도가 20 RPM일 때의 해석 과정을 보여준다. 입자 사이의 강한 점착력 때문에 굴착 토사 모델은 덩어리 형태로 스크루 컨베이어 내부에 가득 채워져 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 8(a)). 스크루 컨베이어의 개구부가 챔버 하부의 중심부에 위치하기 때문에, 시간이 지남에 따라 상부 중심부로부터 하부로의 입자 유출이 발생함을 확인할 수 있다(Fig. 8(b)).

Fig. 9는 스크루 회전속도에 따른 스크루 컨베이어에서 산정되는 평균 토크를 나타낸 그림이다. 스크루 컨베이어에는 평균적으로 약 $6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ~ $15 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 토크가 산정될 것으로 예측되었다. 하지만 주어진 회전속도 조건에서는 회전속도의 증가에 따른 일관성 있는 토크 변화 양상이 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 회전 속도와 상관없이 35.0° 와 40.0° 조건에서는 다른 경사각 조건과 비교해 높은 토크가 산정되는 것으로 파악되었다.

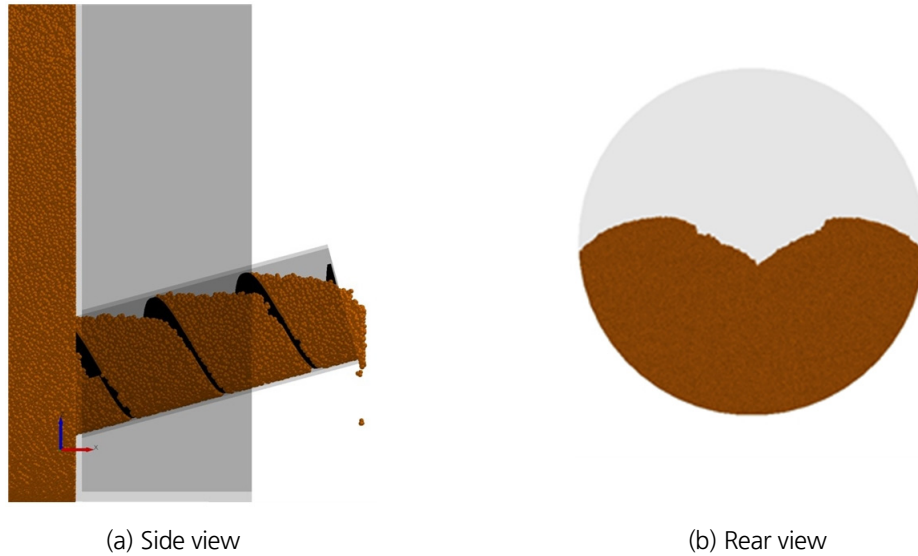


Fig. 8. Simulation process of screw conveyor at 20.0 second (Inclined angle: 15.0, RPM=20.0)

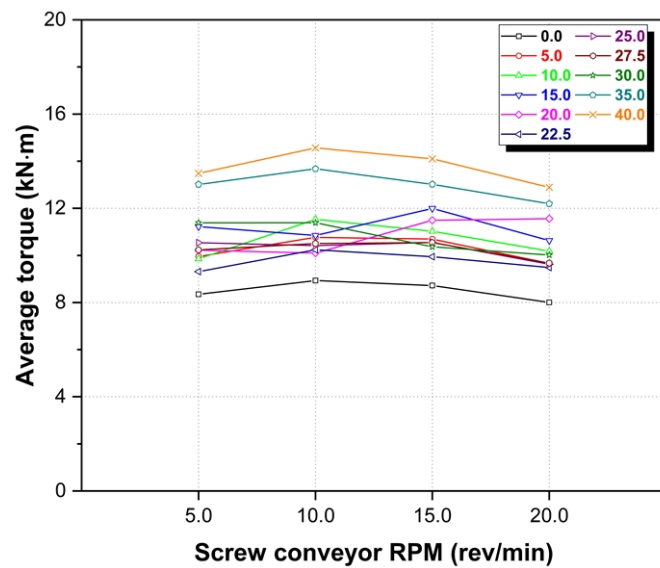


Fig. 9. Average torque with screw conveyor RPM

Fig. 10은 경사각에 따른 스크루 컨베이어에서 산정되는 평균 토크를 분석한 결과 그래프이다. 평균 토크는 경사각 15.0°까지는 서서히 증가하는 것으로 보이며 이후로 감소함을 보이다가 22.5° 이후로는 다시 증가하는 것으로 나타났다. 평균 토크는 경사각 0.0°에서 가장 낮은 값을 나타냈으며, 반면 경사각 40.0°에서는 가장 높은 토크가 산정되었다. 전체적으로 0.0°를 제외할 경우, 22.5°에서 평균적으로 가장 낮은 토크가 산정되는 것으로 파악되었다.

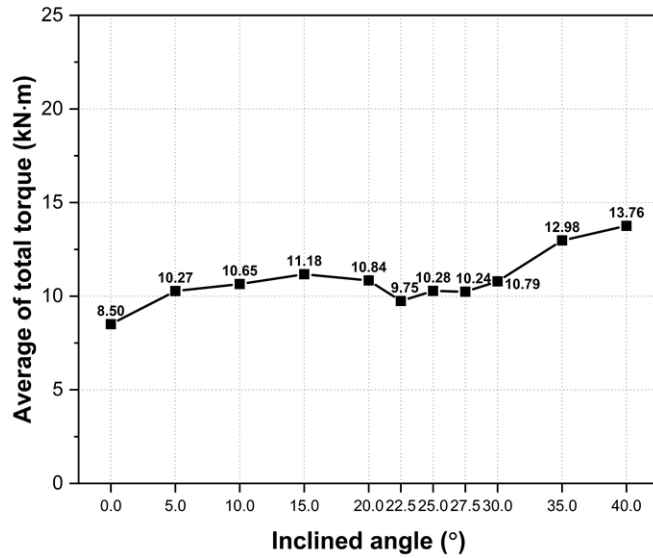


Fig. 10. Average torque with inclined angle

Fig. 11은 산정된 토크를 활용하여 스크루 컨베이어 회전속도에 따른 구동에 필요한 평균 동력을 나타낸 그래프이다. 스크루 컨베이어의 회전속도가 증가함에 따라 평균 소요 동력은 높게 산정됨을 확인할 수 있다. 회전 속도와 상관없이 35.0°와 40.0° 조건에서는 다른 경사각 조건과 비교해 높은 동력이 필요할 것으로 파악되었다.

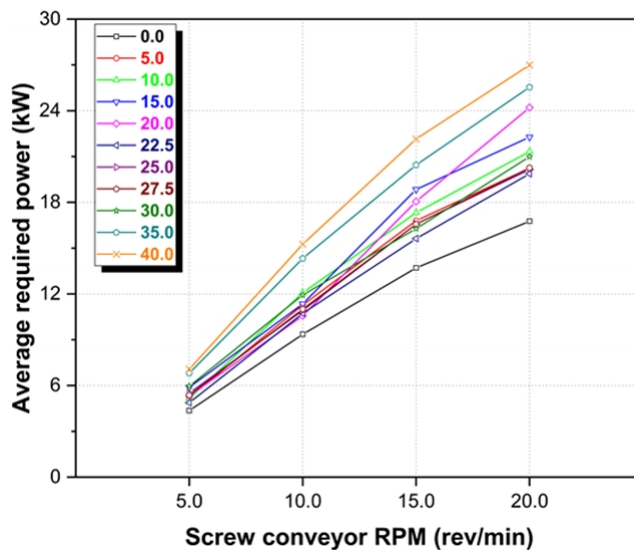


Fig. 11. Average required power with screw conveyor RPM

Fig. 12는 경사각에 따른 스크루 컨베이어 구동에 필요한 소요 동력을 분석한 결과이다. 경사각이 15.0°까지 증가함에 따라 소요 동력은 점차 증가하는 경향을 보였다. 경사각 20.0°와 22.5° 사이에서 소요 동력은 약 12%정도 감소하는 경향을 보였으며, 22.5° 이후로는 다시 점차 증가하는 것으로 나타났다. 경사각이 없는 수평형 스크루 컨베이어에서 가장 낮은 동력이 산정되었으며, 경사

각 40.0° 스크루 컨베이어에서 가장 높은 동력이 필요할 것으로 예측되었다. 단순 구동만을 고려할 경우, 경사각이 없는 수평형 스크루 컨베이어가 가장 우수한 효율을 보일 것으로 예상되었다. 이는 각도가 증가함에 따라 입자에 가해지는 중력에 의해 스크루에서 계산되는 수직방향 힘요소가 증가하면서 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

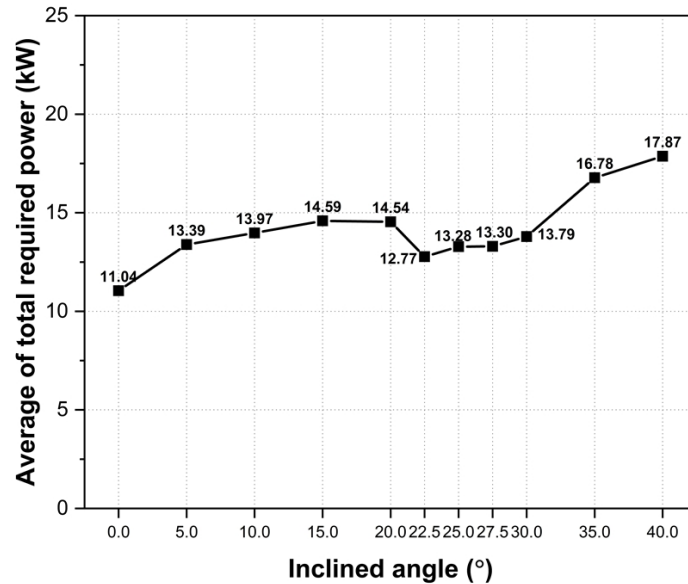


Fig. 12. Average required power with inclined angle

앞서 언급한 바와 같이, 경사각에 따른 배토 과정에 추가로 소요되는 작업량을 간접적으로 평가하기 위해 실제 직경 7.73 m 토압식 쉘드TBM 후방부에 컨베이어 벨트가 바닥 면으로부터 약 3.3 m 높이에 설치되어 있다고 가정하였다. 스크루 컨베이어 길이와 쉘드 길이를 실제 크기로 연장하여 경사각에 따른 값을 계산하여 배출부의 높이를 예상하고 추가 작업의 필요성 여부를 선정하여 Table 2에 정리하였다. 결과적으로 컨베이어 벨트보다 낮은 배출부를 가진 경사각 15.0°이하의 스크루 컨베이어에서는 원활한 배토작업을 위한 추가 작업이 필요할 것으로 예상되었다.

Table 2. Expected height of screw conveyor outlet

Inclined angle	Height of screw conveyor outlet (m)	Necessity of extra work for muck discharge
0.0	0.95	O
5.0	0.78	O
10.0	1.56	O
15.0	2.33	O
20.0	3.08	X
22.5	3.44	X
25.0	3.80	X
27.5	4.16	X
30.0	4.50	X
35.0	5.16	X
40.0	5.79	X

Fig. 13은 스크루 컨베이어 회전속도에 따라 평균적으로 측정되는 단위 시간당 입자의 질량흐름 그래프를 나타낸 그래프이다. 스크루 컨베이어의 회전속도가 증가함에 따라 평균적으로 측정되는 단위 시간당 입자의 질량흐름은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 단위 시간당 입자의 질량흐름 스크루 컨베이어의 회전속도와 상관없이 각도가 증가함에 따라 기울기는 감소하는 경향을 보였다.

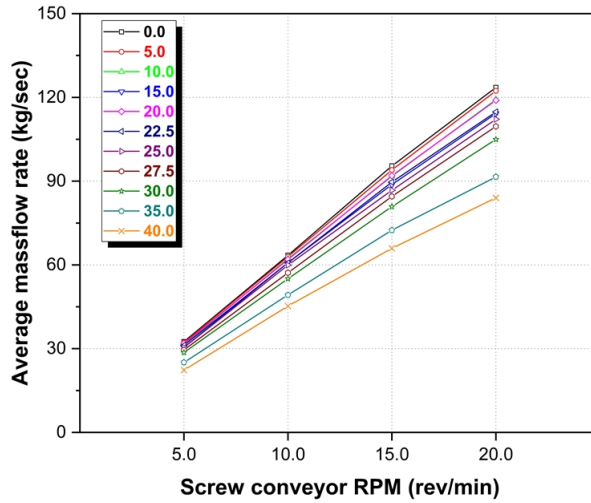


Fig. 13. Average massflow rate with screw conveyor RPM

Fig. 14는 경사각에 따라 평균적으로 측정되는 단위 시간당 입자의 질량흐름을 분석한 결과이다. 경사각 15.0°와 20.0° 사이에서 단위 시간당 입자의 질량흐름이 약 3.5% 정도 증가하는 것을 제외하고, 단위 시간당 입자의 질량흐름은 경사각이 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 단위 시간당 입자의 질량흐름은 경사가 없는 스크루 컨베이어에서 가장 높게 측정되었으며, 경사가 가장 급한 40.0° 조건에서 가장 낮게 측정되었다.

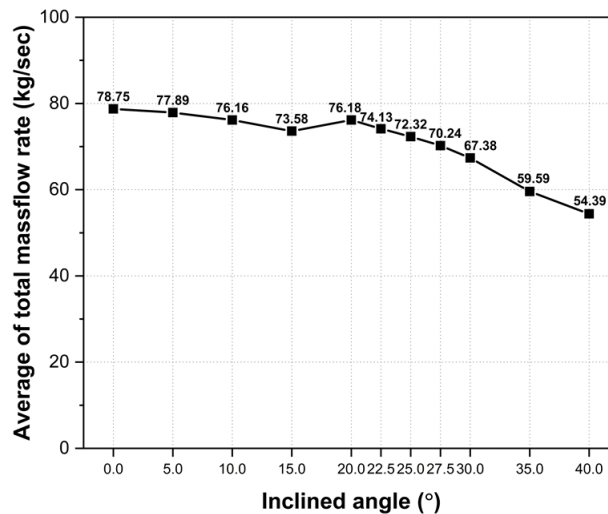


Fig. 14. Average massflow rate with inclined angle

앞서 도출된 네 가지 지표 값을 종합하여 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 경사각을 선정해보았다. 최적의 경사각을 결정하기 위해 각각의 성능 지표 평가 결과에 따라 우선순위를 부여하였으며, 가중치가 고려되지 않은 각 성능 지표의 순위를 종합화하여, 최적의 스크루 컨베이어를 선정하였다. 단, 추가 작업의 필요성 여부를 선정한 지표 에서, 추가 작업이 필요 없는 경우에는 순위로 모두 최우선순위를 부여하였으며, 추가 작업이 필요한 경우에 대해서는 높이차에 따른 순위를 부여하였다.

각 항목 순위의 합산에 대한 산술평군을 통해 종합 평가를 수행해본 결과, 평균 순위 약 2.5을 차지하는 경사각 22.5° 스크루 컨베이어가 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 스크루 컨베이어로 선정되었으며, 경사각 0.0°가 다음 우선 순위로 선정되었다. 다음으로 25.0°, 27.5°가 우선 순위로 평가되었다. 추가 작업에 대해 고려하지 않을 경우, 경사각이 없는 스크루 컨베이어가 가장 높은 순위를 나타냈으며, 다음으로 경사각 22.5°에서 높은 순위를 차지하는 것으로 분석되었다. 하지만 경사각이 없거나 거의 없는 스크루 컨베이어의 경우 배토량 관리를 통한 챔버압 제어, 지하수에 대한 긴급 대처, 스크루 컨베이어 유지관리 등을 비롯한 다양한 측면에서 불리하므로 실제 TBM 장비에는 적용되지 않는 것으로 알려져 있다. 결과적으로 경사각 22.5°가 주어진 굴착 토사조건에서의 최적의 경사각인 것으로 선정되었다. 그 다음으로 25.0°, 27.5°의 경사각을 갖는 스크루 컨베이어가 종합적으로 우수한 성능을 보일 것으로 파악되었으며, 경사각 30.0° 이후로는 경사각이 증가함에 스크루 컨베이어의 성능이 점차 떨어질 것으로 예상되었다. 실제로 본 연구에 사용된 TBM과 비슷한 직경을 갖는 토압식 쉘드 TBM의 실제 굴진에 적용되었던 스크루 컨베이어 경사각은 22.0°였던 것으로 파악되었다(Jung et al., 2011).

본 연구에서 고려한 해석 방법에는 몇 가지 제한사항이 적용되었다. 챔버로의 추가 입자 유입이 없는 상태이고 입자가 모든 구간에서 균질한 상태, 챔버내 압력은 외력이 없는 상태 등이다. 향후 스크루에 대한 평가는 커터헤드와 지반 조건 등을 함께 고려하면 쉘드 TBM 스크루오거의 상태를 종합적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 설계된 쉘드 TBM과 스크루 오거의 제원에 따라 굴진 과정을 모사하여 스크루 오거에 가해지는 토크나 압력을 환산하면 설계된 동력과 제원이 굴착 구간에 적합한지 판단할 수 있는 근거자료로 사용될 수 있을 것이다.

Table 3. Overall ranking for the entire performance evaluation of screw conveyor

Rank (from lowest torque)	Inclined angle	Rank (from lowest power)	Inclined angle	Rank (extra work)	Inclined angle	Rank (from highest discharge rate)	Inclined angle	Final rank	Inclined angle
1	0	1	0.0	1	22.5	1	0.0	1	22.5
2	22.5	2	22.5	1	25.0	2	5.0	2	0.0
3	27.5	3	25.0	1	27.5	3	20.0	3	25.0
4	5	4	27.5	1	30.0	4	10.0	4	27.5
5	25	5	5.0	1	35.0	5	22.5	5	5.0
6	10	6	30.0	1	40.0	6	15.0	6	30.0
7	30	7	10.0	7	20.0	7	25.0	7	20.0
8	20	8	20.0	8	15.0	8	27.5	7	10.0
9	15	9	15.0	9	10.0	9	30.0	9	35.0
10	35	10	35.0	10	5.0	10	35.0	10	15.0
11	40	11	40.0	11	0.0	11	40.0	11	40.0

4. 결론

본 연구에서는 DEM 기법을 활용하여 경사각에 따른 토압식 쉘드TBM에 설치된 실제 크기의 스크루 컨베이어 성능을 네 가지 지표를 통해 각각 평가하였으며, 산정된 지표 값을 종합하여 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 경사각을 선정하였다. 굴착 토사 모델로는 점착력을 갖는 입자가 사용되었으며, 0.0°와 40.0° 이하의 서로 다른 경사각을 갖는 11가지 스크루 컨베이어 모델을 해석하였다. 스크루 컨베이어의 회전에는 네 가지 회전 속도(5, 10, 15, 20 RPM)이 부여되었으며, 스크루 컨베이어의 성능 평가를 위한 지표로는 토크, 소요 동력, 배토를 위해 추가로 소요되는 작업량 및 단위 시간당 배토량을 선정하였다.

- 1) 주어진 회전속도 조건에서 스크루 컨베이어에서 산정되는 평균 토크는 회전속도의 증가에 따른 일관성 있는 토크 변화 양상을 보이지 않았다. 전체적으로 평균 토크는 경사각 0.0°에서 가장 낮은 값을 나타냈으며, 경사각 40.0°에서 가장 높은 토크가 산정되었다.
- 2) 스크루 컨베이어 구동에 필요한 평균 소요 동력은 스크루 컨베이어 회전속도의 상승과 함께 증가하는 것으로 나타났다. 단순 구동만을 고려했을 경우, 경사각이 없는 수평형 스크루 컨베이어가 가장 우수한 효율을 보일 것으로 예상되었다.
- 3) 경사각에 따른 배토 과정에 추가로 소요되는 작업량을 간접적으로 평가해 보기 위해 실제 직경 7.73 m 토압식 쉘드TBM 후 방부에 컨베이어 벨트가 바닥 면으로부터 약 3.3 m 높이에 설치되어 있음을 가정하였다. 결과적으로 20.0° 이하의 경사각을 갖는 스크루 컨베이어에서는 원활한 배토작업을 위한 추가 작업이 필요할 것으로 예상되었다.
- 4) 스크루 컨베이어의 단위 시간당 배토량을 평가하기 위해 입자의 단위 시간당 질량흐름을 측정하였으며, 스크루 컨베이어의 회전속도가 증가함에 따라 단위 시간당 질량흐름은 뚜렷하게 선형적으로 증가하였다. 경사각 15.0°와 20.0° 사이에서 약 3.5% 정도 흐름이 증가하는 것을 제외하고, 단위 시간당 입자의 질량흐름은 경사각이 증가함에 따라 점차 감소하였다. 전체적으로 단위 시간당 입자의 질량흐름은 경사가 없는 스크루 컨베이어에서 가장 높게 측정되었으며, 경사각이 최대인 40.0° 조건에서 가장 낮게 측정되었다.
- 5) 최적의 경사각을 결정하기 위해 각 항목 순위의 합산에 대한 산술평균을 통해 종합 평가를 수행하였으며, 경사각 22.5° 스크루 컨베이어가 주어진 굴착 토사 조건에서의 최적의 스크루 컨베이어로 선정되었다. 그 다음으로 25.0°와 27.5°의 경사각을 갖는 스크루 컨베이어는 전체적으로 주어진 굴착조건에서 우수한 성능을 보일 것으로 예상되었다.
- 6) 실제 굴착 토사에 대한 특성이 수치 해석 모델링 과정에 현실적으로 반영된다면 다양한 굴착 토사 조건에 따른 스크루 컨베이어의 최적의 경사각을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 연구에는 스크루 컨베이어의 피치, 스크루 직경, 스크루 형태 등과 같은 다양한 제원에 따른 스크루 컨베이어 성능 평가가 함께 수행되어야 할 것이다. 더 나아가, 토압식 쉘드TBM의 핵심 기술 중 하나인 첨가재 주입으로 인해 개량되는 굴착 토사에 대한 모사도 함께 반영되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(과제번호: 19SCIP-C129646-03)인 “TBM 커터헤드 설계 자동화 및 운전·제어 시스템 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Al-Hashemi, H. M. B. and Al-Amoudi, O. S. B., 2018, A review on the angle of repose of granular materials, *Powder Technology*, Vol. 330, pp. 397-417.
- EDEM., 2019, EDEM 2019 Documentation, DEM solutions Ltd, Edinburgh.
- Jones, R., 2003, From single particle AFM studies of adhesion and friction to bulk flow: forging the links, *Granular Matter*, Vol. 4, No. 4, pp. 191-204.
- Jones, R., Pollock, H. M., Geldart, D. and Verlinden-Luts, A., 2004, Frictional forces between cohesive powder particles studied by AFM, *Ultramicroscopy*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 59-78.
- Jung, H. S., Choi, J. M., Chun, B. S., Park, J. S. and Lee, Y. J., 2011, Causes of reduction in shield TBM performance – A case study in Seoul. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 26, No. 3, pp. 453-461.
- KICT., 2015, Development of optimized TBM cutterhead design method and high-performance disc cutter, Publication No. ISBN 979-11-954377-2-6. Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Gyeonggi-do.
- Kim, S. H., Kim, J. D. and Park, I. J., 2011, An experimental study on screw conveyor system of EPB shield TBM, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 6, pp. 519-530.
- Kim, J. y., Jeon, B. G., Chae, J. G., Lee, M. W., Kim, S. H. and Kitahara, Y., 2015, Shield TBM excavation method, Trans, Seoul: CIR publishing.
- KWS manufacturing company, 2019, screw conveyor engineering guide, KWS manufacturing company Ltd., Burluson.
- Lee, C., Chang, S. H., Choi, S. W., Park, B., Kang, T. H. and Sim, J. K., 2017a, Preliminary study on a spoke-type EPB shield TBM by discrete element method, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 6, pp. 1029-1044.
- Lee, C., Chang, S. H., Choi, S. W., Park, B., Kang, T. H. and Sim, J. K., 2017b, Numerical Study of Face Plate-Type EPB Shield TBM by Discrete Element Method, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 163-176.
- Lee, G. J., Kwon, T. H. and Kim, H., 2019, DEM-based numerical study on discharge behavior of EPB-TBM screw conveyor for rock, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 127-136.
- Merritt, A. S. and Mair, R. J., 2006, Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: model tests, *Geotechnique*, Vol. 56, No. 9, pp. 605-615.
- Mok, H. S., Lee, J. S. and Cho, J. R., 2004, A Study on Deciding Priority of Optimal Design Guide for Disassembly Process. *IE interfaces*, Vol. 17, No. 4, pp. 414-425.
- Mok, H. S., Han, C. H., Jeon, C. S. and Song, M. J., 2008, Design Principle for Disassemblability of Products. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 48-57.
- Oh, T. S., Kim, S. H., Kim, W. K., Lee, H. Y. and Shin, M. H., 2014, Model test on operation efficiency in the screw conveyor of shielded TBM in soft ground, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 2, pp. 203-211.
- Owen, P. J. and Cleary, P. W., 2009, Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM), *Powder Technology*, Vol. 193, No. 3, pp. 274-288.
- Peila, D., Oggeri, C. and 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.
- Talmon, A. M. and Bezuijen, A., 2002, Muck discharge by the screw conveyor of an EPB Tunnel Boring Machine, 3rd Int. In Symp. on Geotech. Aspects of Underground Construction in Soft Ground, IS-Toulouse.
- Thakur, S. C., Morrissey, J. P., Sun, J., Chen, J. F. and Ooi, J. Y., 2014, Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model, *Granular Matter*, Vol. 16, No. 3, pp. 383-400.