

TECHNICAL NOTE

TBM 굴진향상을 위한 연속굴착형 TBM 부품개조 및 제어기술 소개

최영태¹, 이동건¹, 김문규¹, 오주영², 조정우^{2*}

¹한국생산기술연구원 연구원, ²한국생산기술연구원 수석연구원

Continuous Excavation Type TBM Parts Modification and Control Technology for Improving TBM Performance

Young-Tae Choi¹, Dong-Geon Lee¹, Mun-Gyu Kim¹, Joo-Young Oh², and Jung-Woo Cho^{2*}

¹Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

²Principal Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

*Corresponding author: chojw1665@kitech.re.kr

Received: October 24, 2022

Revised: November 1, 2022

Accepted: November 3, 2022

ABSTRACT

The existing NATM (New Austrian Tunneling Method) has induced civil complaints due to blasting vibration and noise. Mechanized excavation methods such as TBM (Tunnel Boring Machine) are being adopted in the planning and construction of tunneling projects. Shield TBM method is composed of repetition processes of TBM excavation and segment installation, the machine has to be stopped during the later process. Consecutive excavation technology using helical segment is under developing to minimize the stoppage time. The modification of thrust jacks and module are planned to ensure the advance force acting on the inclined surface of helical segment. Also, the integrated system design of hydraulic circuit will be remodeled. This means that the system deactivate the jacks on the installing segment while the others automatically act the thrusting forces on the existing segments. This report briefly introduces the mechanical research part of the current consecutive excavation technological development project of TBM.

Keywords: TBM, Consecutive excavation technology, Thrust jack, Machine remodeling, Reliability

초록

도심지 터널 건설에서 발파공법은 민원이 제기되는 문제점이 있어 적용에 제약받고 있다. 이에 대한 대안으로 TBM 및 기계굴착 공법 적용이 필수적으로 검토되고 있다. 이 중 쉴드 TBM(Tunnel Boring Machine)은 굴진과 세그먼트 체결이 번갈아 반복되며 굴진하는 공정을 가지고 있는데, 세그먼트 체결 동안 굴진을 멈추게 된다. 이러한 가동 정지시간을 최소화하고자 세그먼트 체결 중에도 가동할 수 있는 연속굴착형 TBM 기술이 개발되고 있다. 나선형 세그먼트의 굴진 반력을 확보하기 위해 추진력을 개조하고 신뢰성을 확보하는 연구가 진행 중이다. 또한 체결 중 세그먼트를 제외한 나머지 부분의 추진력을 가동하는 유압제어 및 유압시스템 설계기술이 개발될 예정이다. 본 보고는 연속굴착형 TBM 과제 중 부품개조 및 유압제어 기술에 대한 일부 내용을 소개한다.

핵심어: TBM, 연속굴착, 추진력, 장비개조, 신뢰성



1. 서론

도시 집중화 가속에 따른 교통량 증가와 교통 체증 문제로 인해 광역교통 인프라 확충 수요는 계속해서 증가할 것으로 예측된다. NATM 공법은 화약 발파로 인해 주변 지반에 피해를 주며 인근 지역 통제가 필요한 등 문제점이 있어 도심지에서는 TBM 공법이 필수적이다(Kim et al., 2011). TBM 공법은 전 세계적으로 초장대 터널 시공에 사용되어(Jang et al., 2010) 경제성과 안정성을 확인받았고 수요와 함께 시장 규모 역시 증가 추세이다(Lee et al., 2011). 그러나 국내 TBM 적용률은 아직 1-2%에 그치고 있으며, 그 안에서도 터널 직경 5 m 이하인 소구경 시공이 90% 이상을 차지하고 있다. 향후 TBM 공법을 통한 터널 시공 필요성은 증가하고 있으나 일부 국가가 시장 점유율을 대부분 차지 중인 상황이다. 따라서 국가 경쟁력 확보와 대단면급 TBM 시공성 향상을 위한 연속굴착형 TBM과 세그먼트 통합 시공 기술개발이 필요하다.

TBM 연속굴착 관련 국내외 기술 개발 현황을 간략히 조사한 결과는 다음과 같다. 독일의 경우 굴진과 세그먼트 설치를 병행하는 공법과 이렉터 시물레이터를 개발하였다(Choi et al., 2020). 일본에서도 동시굴진 공법을 개발하였으며, 과거 자동 세그먼트 조립 시스템을 개발하였으나 현재까지 현장 적용성이 낮은 시스템으로 실용화까지 연결되지는 못했다. 국내의 경우, 연속굴착형 TBM에 활용 가능한 실드 TBM 추진잭 선정 및 해석 기술이 개발된 바 있다(Lee et al., 2019). 하지만 기존 유압잭의 경사 및 비틀림 하중에 대한 해석 및 설계는 연속굴착형 고강도 추진잭에 바로 적용할 수 없는 한계점을 지니고 있었다. 또한 세그먼트 이렉터 시스템은 설계와 작동에 관한 기본 기술은 확립되어 있으나 나선형 세그먼트 체결을 위한 추가 연구가 필요하다. 본 보고에서는 연속굴착 기술 개발을 위한 부품 개조 및 시스템 제어기술에 대한 일부 내용과 연구계획을 소개한다.

2. 실드 TBM과 연속굴착 기술

2.1 실드 TBM 굴착 공정

TBM 공법은 지상에 있는 구조물 등에 영향을 주지 않고 터널을 굴착하는 공법으로, 주변암을 지보재로 활용하고 구조적으로 안정된 원형 단면을 형성한다. 크게 그리퍼와 터널 주변 마찰력으로 추진하는 개방형(open) TBM과 후방의 세그먼트 라이닝을 추진잭으로 밀어서 추진하는 밀폐형(shield) TBM으로 구분한다. 실드 TBM은 터널 굴착부터 세그먼트 조립, 굴착 토사, 암반의 배출까지 모든 공정이 자동화된 장비이다(Park, 2021).

실드 TBM의 작동과정은 Fig. 1에 보는 바와 같이 굴진과 세그먼트 조립의 2가지 공정으로 구성된다. 실드잭(추진잭)을 후방의 세그먼트 표면에 고정한 후 추진잭을 압출하는 반력으로 커터헤드가 터널면 방향으로 전진하며 굴착작업이 수행된다(Fig. 1(a)). 당초 설계된 변위에 도달하면 커터헤드 회전을 정지하고, 추진잭을 인입한다. 그리고 새롭게 형성된 터널면에 세그먼트를 조립한다(Fig. 1(b)). 이후 신규 링이 완성되면, 실드잭을 반출하여 세그먼트 링에 밀착하여 고정한다(Fig. 1(c)). 이후, 처음과 같이 추진잭을 압출하며 터널을 굴진한다(Fig. 1(d)).

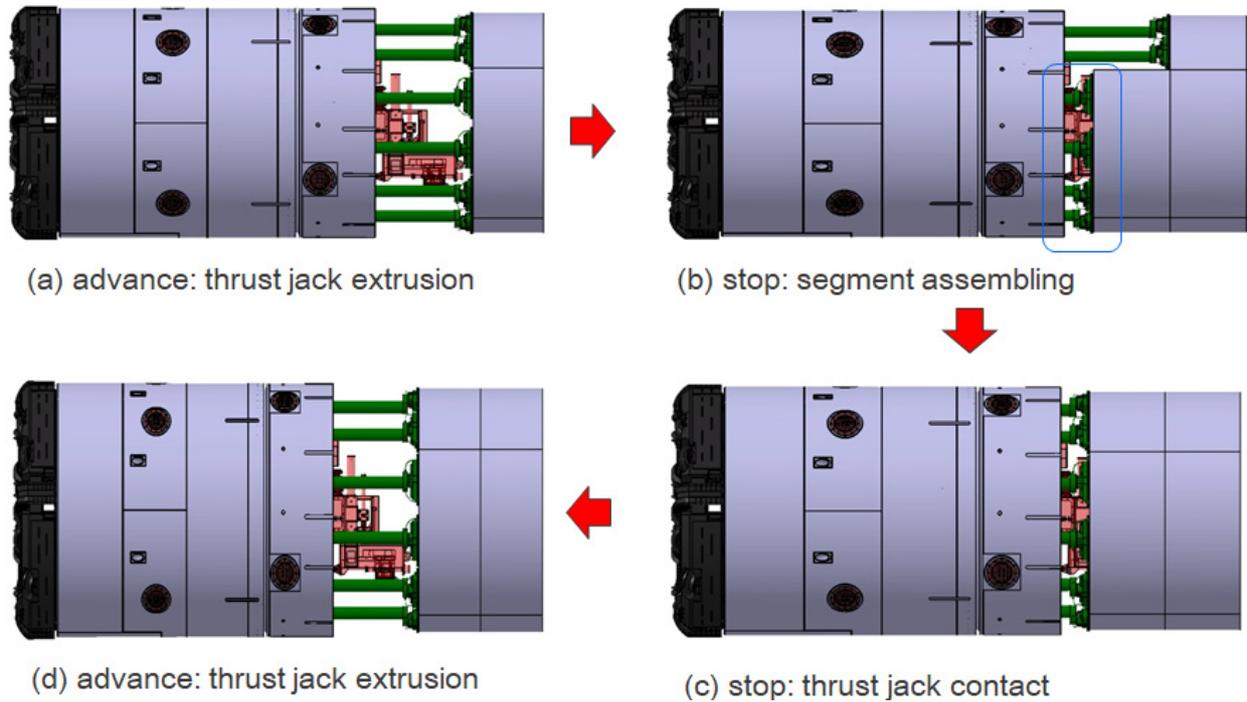


Fig. 1. Operation steps of shield TBM for excavation and segment installation

2.2 TBM 연속굴착 기술

TBM을 연속적으로 굴착하는 기술은 설치 중인 1개의 세그먼트를 제외한 나머지 세그먼트에 추력을 가하여 세그먼트 설치에 따른 TBM 정지 기간을 최소화하는 방법이다. Fig. 2는 연속굴착 TBM기술에서 세그먼트 체결과 동시에 체결위치 이외의 추진잭이 작동하며 TBM 굴진이 진행되는 연속굴착의 개념을 보여주고 있다. 선행연구로 여러 가지 방법이 제안된 바 있지만, 현재 과제는 나선형(helical)의 세그먼트를 사용하여 세그먼트가 1회전 하는 동안 추진잭의 최대 스트로크만큼 사용하는 방법을 채택하였다. 만약 굴진과 세그먼트 설치 작업을 병행하여 연속적으로 굴진하는 방법이 가능할 경우, 정지 기간을 굴진 기간으로 단순히 가정하면 기존 실드공법에 비해 30%이상 굴진율이 향상될 것으로 추산된다. 또한 TBM 굴진 중단 후 재가동으로 인한 장비 부하를 절감시킬 수 있고, 가동을 중단하지 않으므로 지반 침하 관리 및 막장압 관리에 용이한 장점도 지니고 있다.

기존 실드공법은 1개의 세그먼트 링이 완성될 때까지 굴진이 정지되지만, 신규 개발 중인 연속굴착 방식은 이 정지 기간을 최소화하거나 완전히 제거하는 방식을 추구한다. 이 기술은 나선형 세그먼트의 경사면에 페데스탈이 안정적으로 접촉, 추진될 수 있도록 추진잭 고강성 설계기술, 신뢰성 시험기술이 포함된다. 그리고 추진잭들의 압출, 인입을 그룹핑하여 자동제어할 수 있는 유압시스템 제어기술과 나선형 세그먼트 설계기술, 이렉터 개조를 통한 세그먼트 정밀제어, 설치기술 등이 개발 중에 있다. 따라서 연속굴착 기술은 기계설계, 신뢰성공학, 세그먼트 설계, 유압제어를 포괄하는 토목건설공학과 기계설계공학의 융합기술에 해당한다.

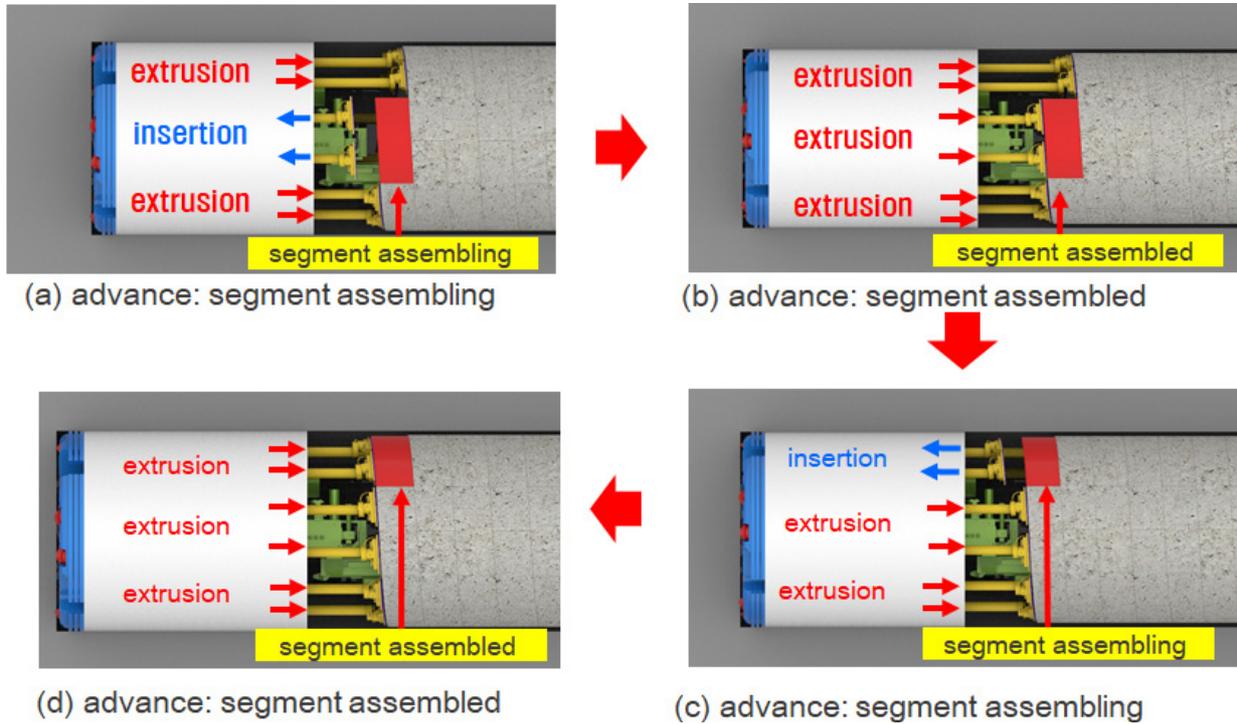


Fig. 2. Operation concept of TBM consecutive excavation technology

3. 기술개발 내용

TBM 연속굴착 기술 중 장비 개조와 관련된 기술은 굴진 반력 확보를 위한 연속굴착형 장비부품 개조 기술, TBM 유압시스템 설계 및 제어기술, 세그먼트 이렉터 시스템 보완기술로 구성된다.

3.1 연속굴착형 TBM 장비개조

나선형 세그먼트의 경사면에 추진잭을 안정적으로 안착시켜 충분한 반력을 확보하기 위해서 기존 추진잭을 일부 개조하고, 신뢰성을 검증해야 한다. 그러기 위해서는 연속굴착형 추진잭 규격을 선정 후 페데스탈을 설계해야 한다. 그리고 개조된 추진잭 시작품이 제작되면 TBM에 조립하기에 앞서 유사 환경에서 검증시험을 수행해야 한다.

유압실린더의 안전성을 시험하는 방법으로 수직방향 압축좌굴시험(Fig. 3(a))과 횡방향 굽힘시험(Fig. 3(b))이 있다. 이 방법을 그대로 활용하려면 경사도에 대한 수직방향 분력을 압축시험으로, 횡방향 분력을 굽힘시험으로 각각 분할해서 모사해야 한다. 경사하중에 의한 안전성을 1회의 시험으로 모사하기 위해 좌굴시험의 반력대에 경사면을 설치하는 방법을 고안하고 있다. 경사면 가압 반력용 지그를 제작한 후 압축 좌굴시험을 수행할 예정이다. 설계된 경사도에 대해 좌굴 안전성이 검증되면, 추진잭 신뢰성 내구시험용 테스트벤치를 구성하여 시작품 신뢰성 시험코드를 완성하고, TBM 추진잭과 페데스탈에 대한 시제품 실증시험을 진행할 계획이다.

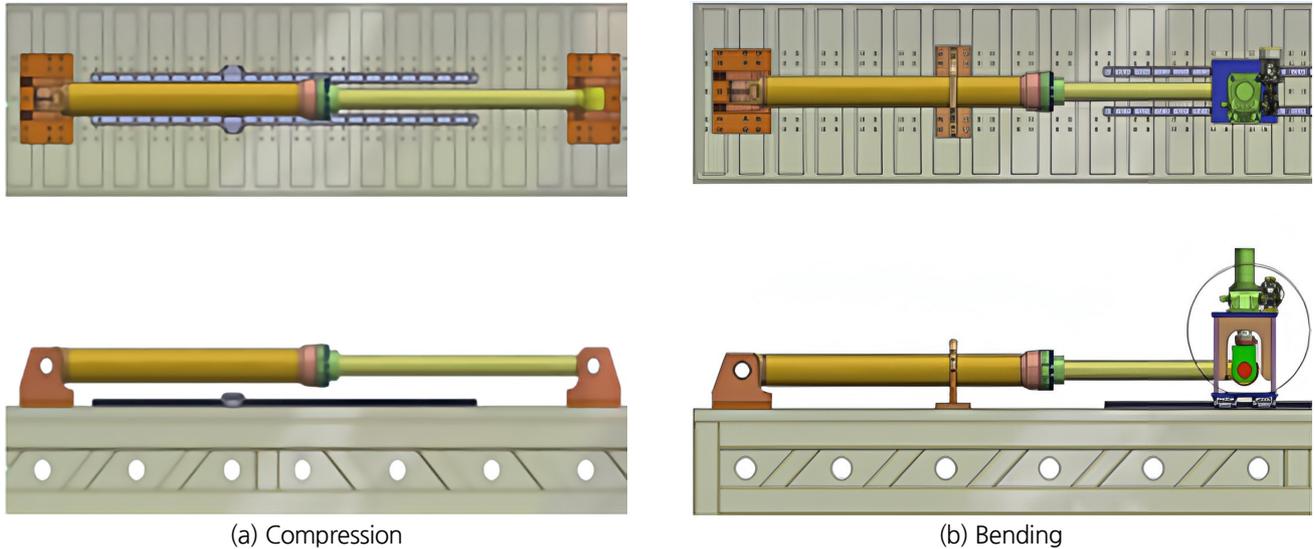


Fig. 3. Testing methods of hydraulic jacks

3.2 연속굴착형 TBM 유압시스템

일반적인 TBM은 굴진 시 추진잭이 한꺼번에 압출되는 일괄적인 가력방식을 사용한다. 반면 연속굴착기술에서는 이와 다른 순차적 가력방식이 필요하다. Fig. 4는 연속굴착 추진방식 중 특정 사례의 예시를 보여준다. 그러므로 유압 시스템의 개조와 운전 제어코드의 수정이 필요하다. 먼저 TBM 추진잭 모듈 동조 제어를 위한 MCV(main control valve) 시스템의 주요 제원을 분석하고, 연속굴착 과정에 따른 작동설계 레이아웃을 구성하고 있다. 가상의 시나리오가 구성되면 추진잭 압출, 인입에 관한 전반적인 작동순서를 자동화하고, 추진잭-MCV-제어기 연동 아키텍처를 완성할 예정이다.

아키텍처는 유압 제어모듈의 가상 작동 시뮬레이션을 위한 것으로 MCV와 추진잭 간의 연계 모델이 개발되고 있다. 기존 알고리즘에 수집한 TBM 굴진 시나리오를 우선 적용하여 설계된 제어 알고리즘을 검증한 후, 연속굴착 시나리오별 알고리즘 및 해석 모델을 추가로 확보해 나갈 예정이다. 이후 TBM 모니터링 모듈과 추진잭 운전 관리시스템을 TBM 완성차에 탑재 후 파일럿 시험을 진행하고 시스템을 보완할 계획이다.

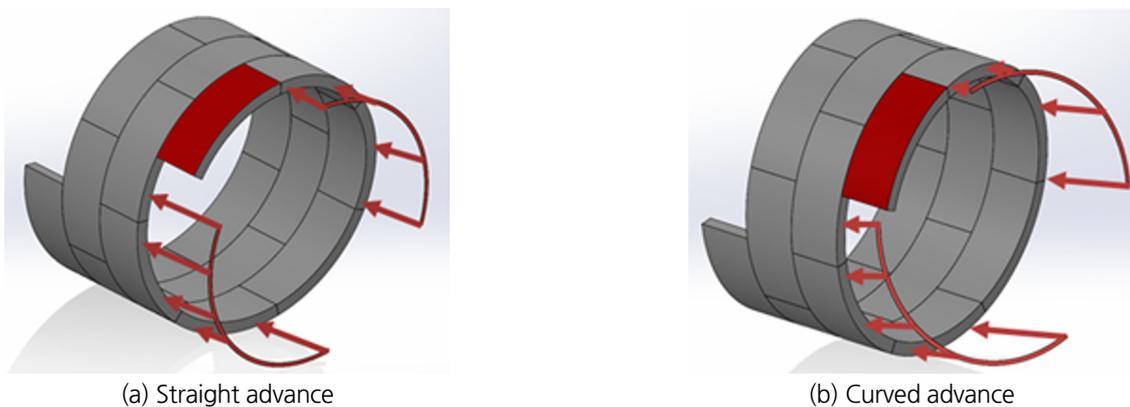


Fig. 4. Consecutive loading concept of thrust jacks

3.3 연속굴착형 이렉터

굴진과 세그먼트 설치를 병행하기 위해 이렉터도 연속굴착형 시스템으로 변환 혹은 개조해야 한다. 기존 이렉터의 작동 메커니즘은 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 그 단계는 각각 (a) 세그먼트 공급, (b) 세그먼트 파지 및 인양, (c) 회전, (d) 이동 및 조정, (e) 세그먼트 조립, (f) 링형성 완료 및 복귀로 구성된다.

이에 비해 나선형 세그먼트는 세그먼트 링을 폐곡선 형태로 완성하지 않고 헬리컬 타입으로 연속적으로 적층하게 된다. 따라서 Fig. 6에서 보는 바와 같이 세그먼트가 1회전을 하는 동안 (a)세그먼트 공급, (b)세그먼트 체결이라는 2단계가 연속적으로 반복되는 형태를 가진다.

나선형 세그먼트의 설치 가능한 이렉터의 운동 자유도를 계산한 결과, 나선 방향으로 회전이 필요하여 1 자유도가 추가로 필요하다고 분석된 바 있다(Science & Technology Strategy Institute, 2021). 따라서 다자유도 이렉터의 구현방안 도면 작성 후 상세 부품 구조 해석을 진행하고 있다. 이후 상세설계도를 작성하여 제어프로그램을 구성하고, 이렉터 개조를 완료할 예정이다. TBM 완성차의 유압모듈 개조가 끝나면 이렉터 시스템의 시뮬레이션 혹은 파일럿 시험을 진행하여 자유도, 설치 속도, 정확도 등을 측정하여 실증시험 전 검증을 완료할 계획이다.

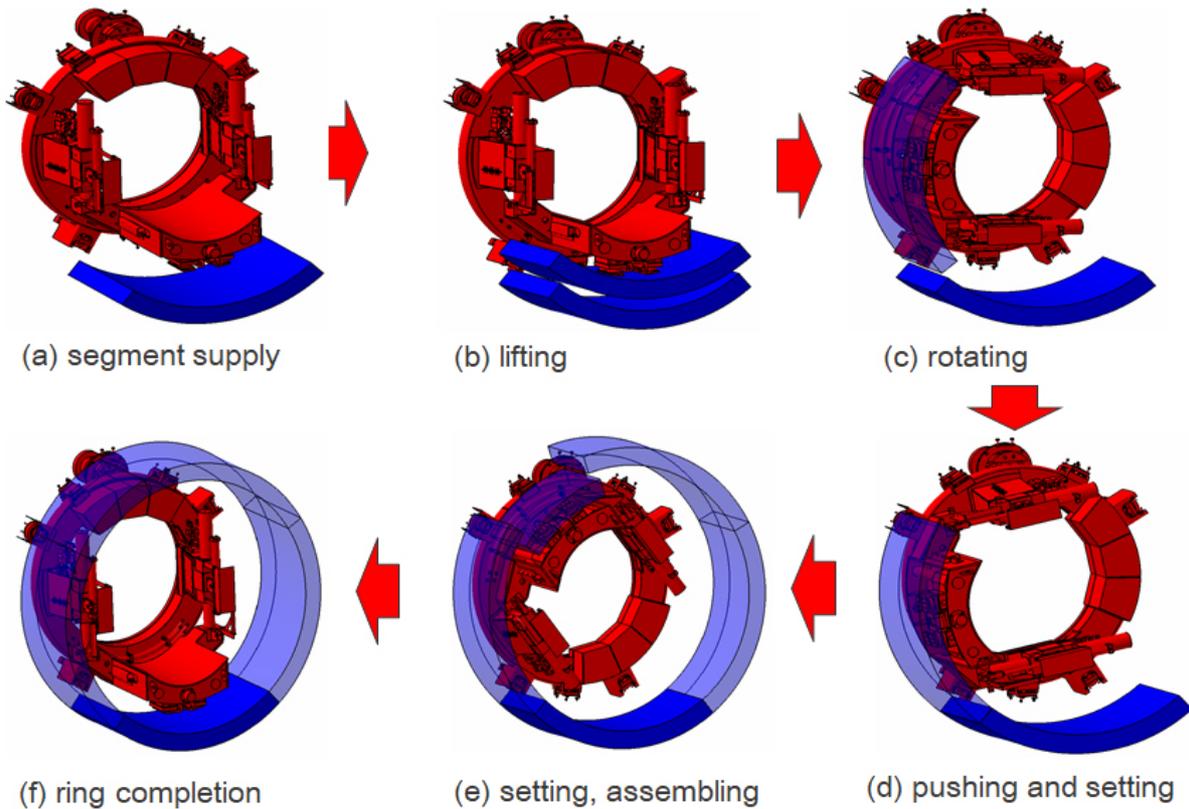


Fig. 5. Conventional installation steps of TBM segment

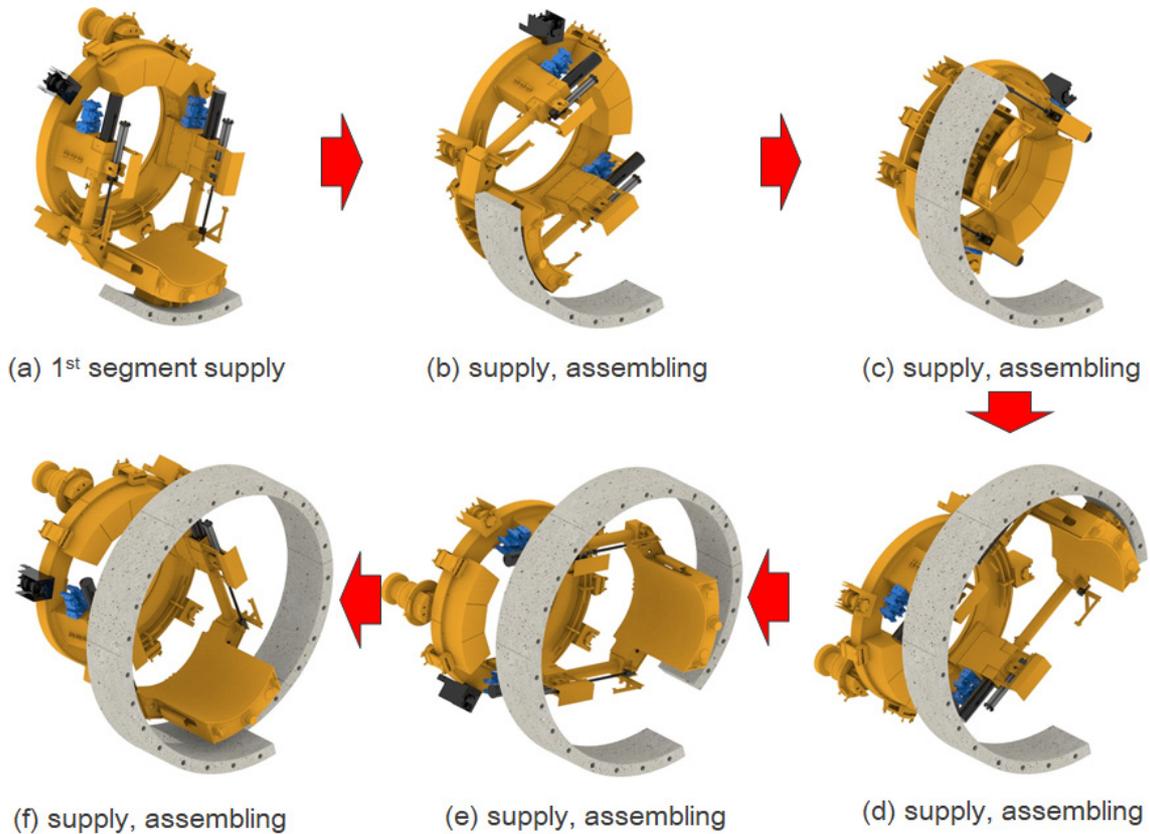


Fig. 6. Consecutive installation process of helical type segment

4. 결론

연속굴착형 TBM 기술개발 사업은 선진국 추발형 기술개발 형태에서 탈피하여 해외시장을 선도할 수 있는 혁신기술을 개발하려는 목표로 기획되었다. 이 사업은 세그먼트 체결 중 정지시간을 최소화하는 기술로서 개발 성공 시 굴진율의 30% 향상을 목표로 하고 있다. 해당 연구과제의 구성기술은 TBM 부품 및 유압시스템 개조, 나선형 세그먼트 제작 및 평가, TBM 실증시험 및 유지관리로 구성되어 있다. 본 기술보고는 국토교통과학기술 연구개발사업으로 진행되고 있는 TBM 굴진향상을 위한 연속굴착 기술개발 사업 중 TBM 장비개조 부분의 연구내용과 향후 계획을 간단히 소개하였다.

TBM 장비 개조와 관련된 연구는 굴진 반력 확보를 위한 장비 개조 기술, 연속굴착형 TBM 굴진관리 시스템 설계 및 제어기술, 센서 기반 연속굴착형 세그먼트 이렉터 시스템 보완으로 3가지 세부기술로 구성된다. 장비개조 기술은 나선형 세그먼트에 접지하는 추진축을 개조하여 안전성과 신뢰성을 검증하는 부분을 포함하고 있다. 연속굴착형 유압시스템 부분은 추진축의 순차적인 압출과 인입 동작을 연속굴착 시나리오에 맞게 자동화하여 통합제어하는 기술로 개발되고 있다. 마지막으로 세그먼트 이렉터 시스템 보완 부분은 나선형 세그먼트를 신속하고 정확하게 체결하기 위하여 자유도를 향상하고 정확도를 검증하는 역할을 맡고 있다.

본 사업은 연속굴착형 TBM 기술개발을 통해 기술적, 경제적 측면에서 다양한 직간접적 효과들이 유발될 것으로 기대하고 있다. 우선 시공 중에 발생하는 시나리오에 따라 적절하게 운용된다면 TBM 굴진율이 급속히 향상될 것으로 예상된다. 이를 통해 연속굴착 기술 확보로 세계적으로 초기 단계에 있는 TBM 연속굴착 기술 분야에서 국제경쟁력을 가질 수 있다. TBM 기술을 기반으로 국

내 터널건설 산업에서 관련 장비와 부품 등의 생산시장 및 재활용 시장이 보다 활성화될 것이다. 또한 중대단면 TBM 기술 확보에 따라 정부 및 지자체의 스마트 인프라 구축시기를 앞당길 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)의 ‘TBM 굴진향상을 위한 연속굴착 기술개발(RS-2022-00144188)’ 사업을 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Choi, S.W., Lee, C.H., Kang, T.H., and Chang, S.H., 2020, Current Status of Technical Development for TBM Simulator, Tunnel and Underground Space, 30(5), 433-445.
- Jang, S.H., Kim, S.H., Lee, S.W., and Bae, G.J., 2010, Construction of Long Undersea Tunnel by Shield TBM, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 12(3), 9-22.
- Kim, Y.G., Moon, J.S., Shim, J.B., Lee, S.B., Choi, C.R., and Chun, Y.C., 2011, Comparative risk analysis of NATM and TBM for mixed-face large-diameter urban tunneling, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 13(1), 19-32.
- Lee, H.S., Na, Y.M., Jang, H.S., Suk, I.H., Kang, S.H., Kim, H.T., and Park, J.K., 2019, A Study on the Stability of Shield TBM Thrust Jack in the Behavior of Operating Fluid According to Thrust Force, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 18(1), 38-45.
- Lee, S.W., Jang, S.H., and Choe, S.U., 2011, Forecasting Future Demand for TBM Tunnels in Korea, Geotechnical Engineering, 27(2), 18-26.
- Park, J.S., 2021, Focusing on the comparison between Gripper TBM and Slurry Shield TBM, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 23(1), 44-60.
- Science & Technology Strategy Institute, 2021, Consecutive Excavation Technological Development Project of Tunnel Boring Machine, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 136-155.