

TECHNICAL NOTE

연속굴착 실드 TBM 기술 관련 해외기술 및 개발사례 조사

김문규¹, 조정우^{2*}, 차형석³

¹한국생산기술연구원 연구원, ²한국생산기술연구원 수석연구원, ³해람특허사무소 대표변리사

Investigation of Prior Technology and Development Case for Consecutive Excavation Technique of Shield TBM

Mun-Gyu Kim¹, Jung-Woo Cho^{2*}, and Hyeong-seog Cha³

¹Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

²Principal Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

³Representative Patent Attorney, Haeram Patent Office

*Corresponding author: chojw1665@kitech.re.kr

Received: August 21, 2023

Revised: September 25, 2023

Accepted: September 25, 2023

ABSTRACT

Continuous excavation technologies are developed to improve the excavation rate of shield TBM. Continuous excavation is a technology that provides thrust to segments, excluding being installed one, to reduce tunneling downtime. This paper investigated the prior technology related to continuous excavation segments. The main technology was classified into helical segment, honeycomb segment, and conventional segment methods. The helical segment method has not been applied in actual construction yet, and the honeycomb segment method has not succeeded in commercialization. The continuous excavation method using conventional segments has been successfully demonstrated. The thrust force and operation method of the thrust jacks for the semi-continuous technology were analyzed. Continuous excavation TBM research is also progressing in Korea, and through the analysis of successful cases, the need to develop independent continuous excavation methods has been identified.

Keywords: Continuous excavation, Shield TBM, Helical segment, Honeycomb segment, Semi-continuous method

초록

TBM의 실굴진율을 향상시키기 위한 연속굴착 기술들이 개발되고 있다. 연속굴착은 설치중인 세그먼트를 제외한 나머지 세그먼트에 추력을 가해, 굴진 정지 시간을 줄이는 기술이다. 본 기술보고는 연속굴착 세그먼트에 관한 선행기술을 조사하였다. 주요 선행기술을 헬리컬 세그먼트, 육각형 세그먼트, 기존 세그먼트 방법으로 분류했다. 헬리컬 세그먼트 방법은 아직 시공사례가 없으며, 육각형 세그먼트 방법은 상용화에 성공하지 못했다. 기존 세그먼트를 이용한 연속굴착 방법은 실증에 성공했다. 해당 기술에 대한 추진력 추력, 운영방법을 분석했다. 국내에서도 TBM 연속굴착 연구개발이 진행 중이며, 성공사례 분석을 통해 독자적인 연속굴착 방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

핵심어: 연속굴착, 실드 TBM, 헬리컬 세그먼트, 육각형 세그먼트, 부분 연속굴착 공법



1. 서론

일반적인 쉴드 TBM의 굴진 과정을 설명하면 Fig. 1과 같이 표현된다. 추진잭 추진과 세그먼트 체결이라는 2가지 과정으로 진행된다. 추진잭을 세그먼트 접지면에 밀착한 후 압출하면 TBM 본체가 전진하며 굴진이 시작된다(Fig. 1(a)). 1회 굴진거리에 도달하면 TBM 본체의 가동(추진 및 회전)을 전체 정지하고, 추진잭을 인입한다. 그리고 신규 세그먼트를 조립한다(Fig. 1(b)). 이후 새로운 세그먼트 링이 완성되면, 쉴드잭을 반출하여 굴진을 재개하는 방식을 반복한다(Choi et al., 2022). 이처럼 기존 쉴드 TBM은 세그먼트 체결 작업 시 TBM 굴진작업을 정지해야 한다. 이 부분을 해결하여 정지기간을 최소화하는 방식, 즉 연속굴착 방법을 개발하고자 여러 국가에서 특허화한 바 있다. 본 보고에서는 이와 관련된 선행문헌을 집중적으로 조사하였다.

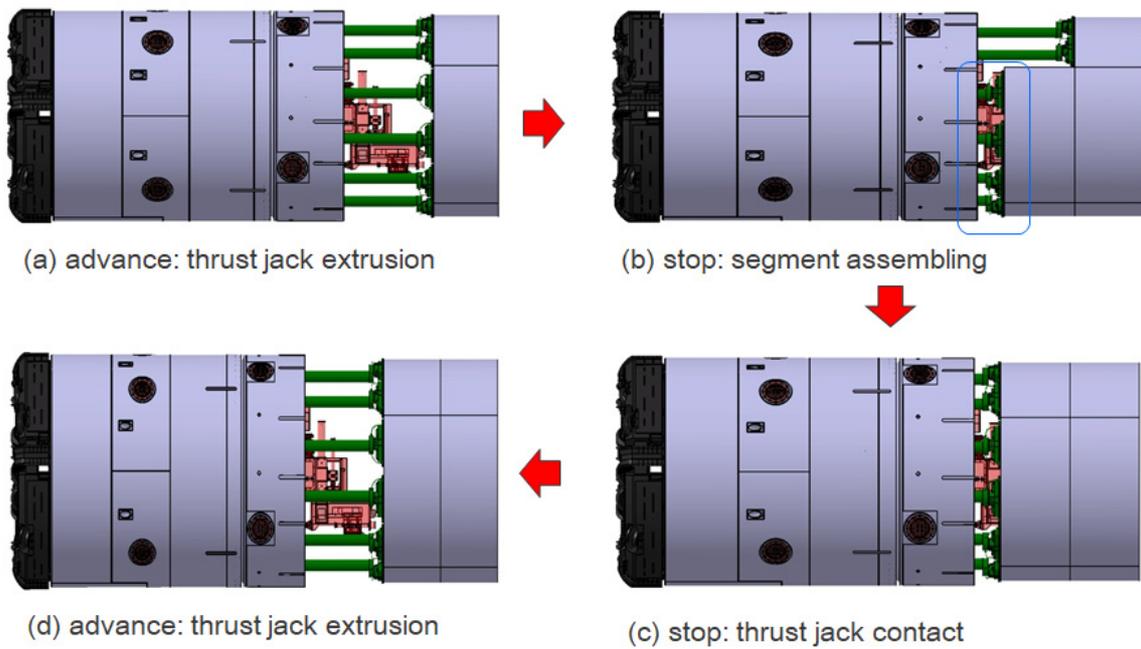


Fig. 1. Excavation and segment assembling process of shield TBM(Choi et al., 2022)

연속굴착(Consecutive excavation)의 개념은 1960년대부터 세계 각국에서 제안되었으나, 해당 방법중 실용화에 완전히 성공한 것은 더블 쉴드 공법 외에 없는 것으로 판단된다. 선행 특허로 각국에서 여러 가지 방법이 출원된 바 있다. 나선형(helical)의 세그먼트를 사용하여 세그먼트가 1회전하는 동안 추진잭의 최대 스트로크만큼 사용하는 방법은 캐나다, 미국을 중심으로 제안되었고, 육각형 혹은 계단식 세그먼트를 이용하는 방법은 일본에서 여러 건이 발명되어 실제 시공까지 수행된 바 있다. 이 중 나선형 세그먼트를 이용한 연속굴착 방식은(Kunststoffverarbeitung Voss, 1966, Spiroll, 1974, Dalmasso, 1978), Fig. 2(a)와 같이 적색 세그먼트가 설치중일 때, 해당 위치를 벗어난 나머지 세그먼트에 추진잭을 압출하여 세그먼트 설치 중의 TBM 정지기간을 최소화하여 전체적인 굴진시간을 증대하는 아이디어이다. 이를 적용한 터널공사가 아직 보고된 바 없는 것으로 보아 아직 실용화에 성공하지 못한 것으로 추정된다.

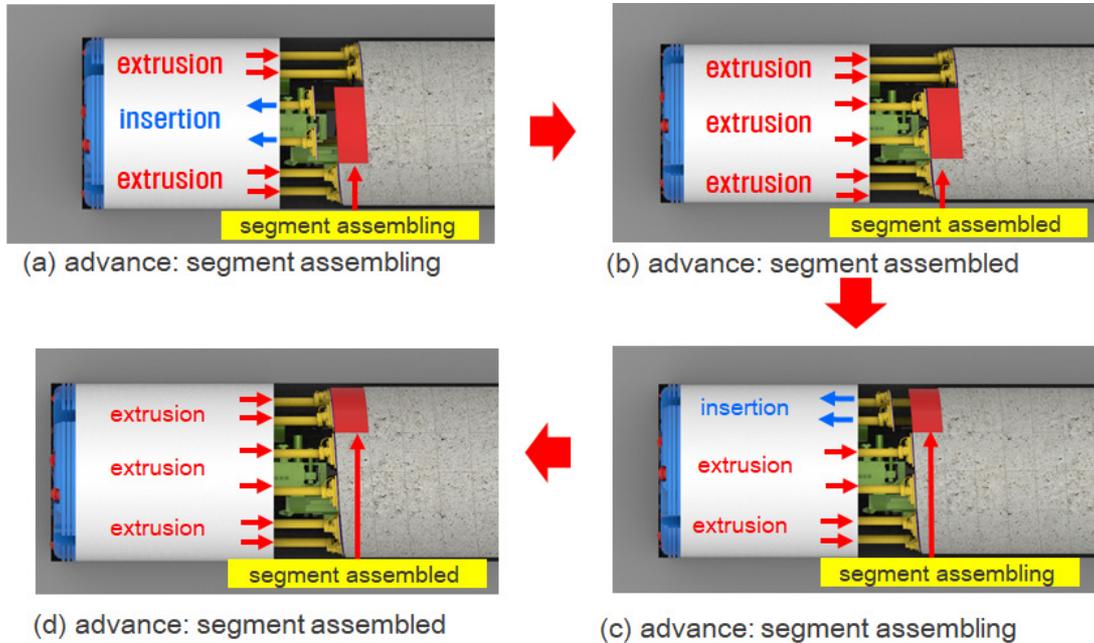


Fig. 2. Operating method of continuous excavation TBM (Choi et al., 2022)

2. 연속굴착 관련 기술 분석

TBM의 연속굴진 혹은 연속굴착 기술 및 이에 필요한 세그먼트에 대하여 특허 선행기술을 조사하였다. 검색대상 자료, 국가, 그리고 분석구간을 Table 1에 정리하였다. 한국, 일본, 미국, 유럽, 중국, 독일의 출원 건들에 대하여 검색하였다.

Table 1. Research subject (Cho and Cha, 2023)

Classification	Nation	Search Database	Analysis Section and Search Date	Keyword
Patent Application and Publication, Utility Model Publication, Registered Patent, Utility Mode	Korea (KR)	KIPRIS, espacenet, Google patent	Analysis Section : Patents and Utility Model Publications applied or registered by 2022.12.20 Search Date : 2022.12.18~2022.12.21	Tunnel, continuous, consecutive, semi, excavation, TBM, tunnel boring machine, tunnel driving machine, shield, segment, honey comb, hexagon, lining, spiral, helical, helix, thrust jack, hydraulic cylinder
	Japan (JP)	KIPRIS, espacenet, Google patent		
	USA (US)	KIPRIS, espacenet, Google patent		
	Europe (EPO)	KIPRIS, espacenet, Google patent		
	China (CN)	KIPRIS, espacenet, Google patent		
	Germany (DE)	KIPRIS, espacenet, Google patent		

각국 출원인의 검색 건을 Fig. 3에 나타내었다. 독일 Herrenknecht의 출원수가 가장 많고 그 다음이 영국의 Fairclough Construction Group이었다. 그런데, Fairclough Construction Group의 출원수가 많은 것은 US 4104885 A(1977년 출원)의 폐밀

리 출원이 많았기 때문이었고, 출원후 20년 이상 경과되어 특허권이 소멸되었으므로, 그 중요성은 상대적으로 낮은 것으로 판단되었다(Cho and Cha, 2023).

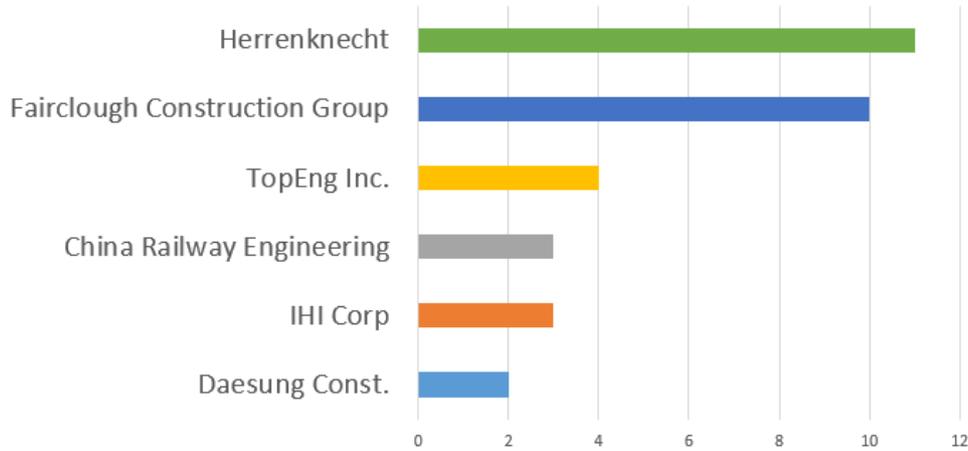


Fig. 3. Number of Patent Applications

Fig. 4는 1990년 이후 관련 특허의 출원 건수를 보여주고 있다. 1990년부터 2016년까지 출원수에 큰 변동이 없다가 2019년에 15건이 출원되어 출원수가 급증했는데, 이것은 2019년에 미국 TopEng의 패밀리 출원(KR10-2020-0141033A 등)과 Herrenknecht의 패밀리 출원(US 2021-0032991 A1 등, Herrenknecht AG, 2021)이 여러 국가(캐나다, 미국, 호주, 일본, 중국, 유럽 등)에 한꺼번에 출원되었기 때문이다. 또한 독일에서 연속굴착기술이 개발되고 있는 정보가 현장을 통해서 유통되었기 때문에 기술의 선점을 위해서 미국, 중국 등지에서도 동시에 관련 기술의 자국내 선점을 위해 유사년도에 동시에 출원했기 때문으로도 분석된다. 그런데 2020년에 출원수가 3건으로 다시 감소하였으므로, 연속굴착 기술이 본격적으로 개발 추세에 접어들었는지 정확히 분석하기 위해서는 향후 수년간 출원 건수를 지속적으로 분석해야 할 것으로 보인다.

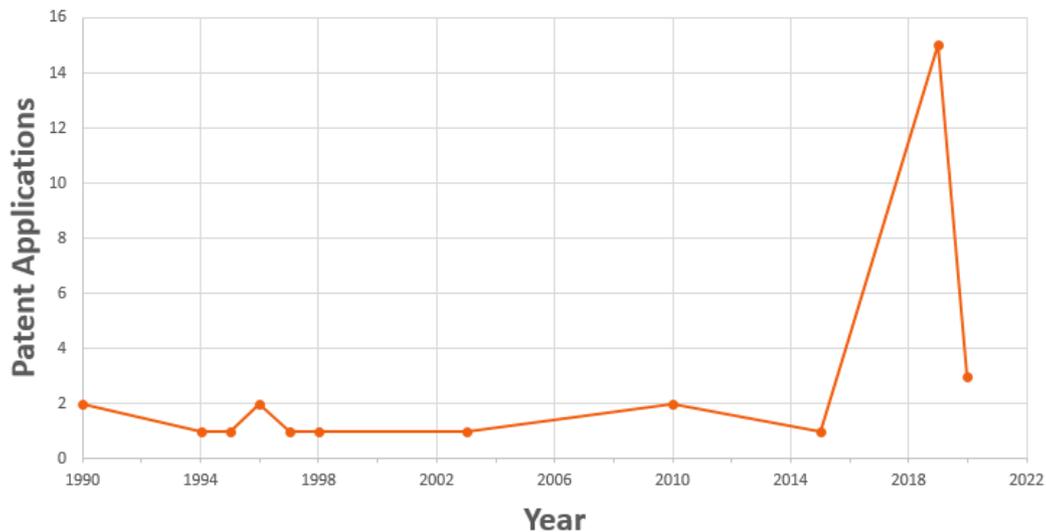


Fig. 4. Number of relevant patent applications by year since 1990

TBM 연속굴착기술 관련 선행기술 조사 결과를 요약하면 다음과 같다. 쉴드 TBM 연속굴착 관련 기술은 1970년대에 순수 아이디어상태로 제안되어 오다가 2018년 이후 최근에 구체적으로 개발되기 시작하였다. 이 계기는 독일의 Semi-continuous TBM 굴착기술이 실증과 상용화에 성공하였기 때문으로 분석된다. 하지만, 초기 아이디어로 제안된 헬리컬 및 허니컴 세그먼트 기술 관련 특허는 2020년 이후에도 몇 건에 불과하여 해당 기술의 완성도는 아직 낮은 것으로 파악된다. 따라서 해당 기술분야에 대한 연구개발 및, 국내외 특허권 획득이 필요할 것으로 사료된다.

3. 주요 기술 분석

앞에서 분석한 선행기술은 3가지 타입으로 분류할 수 있다. 가장 먼저 제안된 연속굴착 기술은 헬리컬 세그먼트로 캐나다 Spiroll Co에서 미국에 출원한 특허이다. 이후 미국, 중국 등에서 세부기술들이 하위기술로 각국에 출원된 바 있다. 2번째 특허는 육각형 세그먼트를 사용하여 연속굴진을 하는 형태로 주로 일본에서 발명되고 시험시공까지 진행된 바 있다. 마지막은 독일에서 개발한 기술로서 기존의 세그먼트를 이용하여 부분적인 연속굴착(semi-continuous excavation) 기술을 개발하여 영국 터널현장의 실증시공까지 완료한 상태이다. 해당 기술 3가지를 아래에 상세히 설명하였다.

3.1 헬리컬 세그먼트 방식

헬리컬 혹은 스파이럴 방식의 터널 라이닝 기술의 최초 발명은 1965년 독일 특허(Fig. 5)로 검색되는데, 광산용으로 먼저 제안되고 난 이후에 터널에 확산된 것으로 파악된다(DE 1229961 B, Kunststoffverarbeitung Voss, 1966). 이후, 캐나다(Spiroll, 1974)에서 쉴드 터널용으로 헬리컬 세그먼트의 설계, 체결방법이 제안되고(CA 0955764 A, Fig. 6), 프랑스에서는 Fig. 7과 같이 쉴드 TBM의 추진방법까지 보다 구체적인 기술로 제안된다(FR 2435599 A1, Dalmasso, 1978). 해당 특허들은 모두 20년이상 경과되어 공개된 상태로 1990년 이후부터 나온 특허는 해당 특허의 하위 개념에 해당한다.

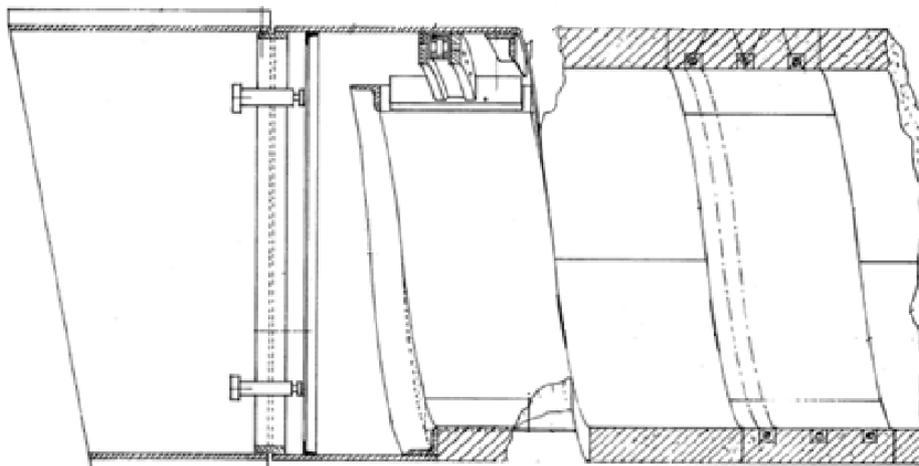


Fig. 5. Cross-sectionally circular stud (DE 1229961 B, Kunststoffverarbeitung Voss, 1966)

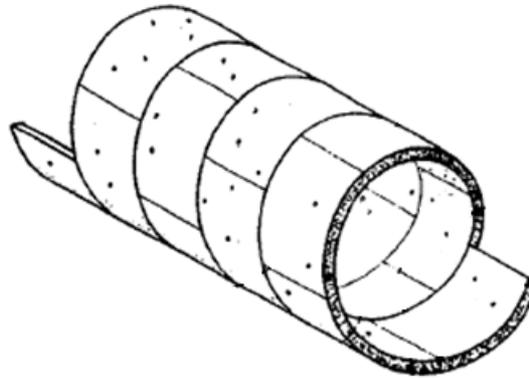


Fig. 6. Helical section tunnel (CA 0955764 A, Spiroll, 1974)

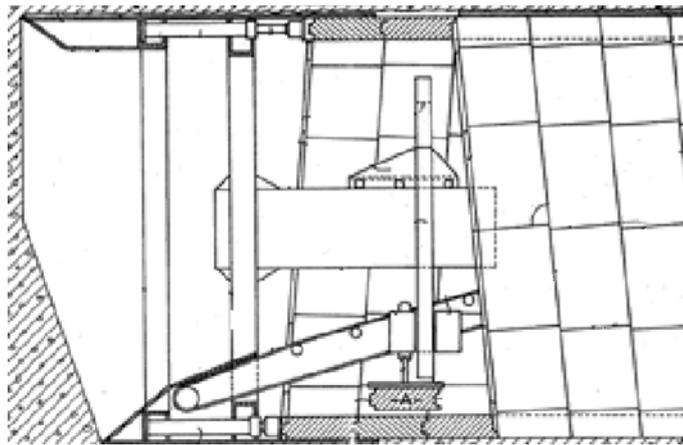


Fig. 7. Helicoidal mine tunnel lining (FR 2435599 A1, Dalmasso, 1978)

1990년부터 2018년까지 관련 특허의 출원 건수는 매년 1~2건에 불과하였다가, 2019년 독일에서 특허가 제안되고 관련 터널실증이 성공하면서 다시 관심을 받기 시작한다. Herrenknecht는 2010년 헬리컬 타입 고강도 세그먼트와 설계, 조립방법에 대한 특허 (Fig. 8)를 독일과 유럽특허청에 출원하였다(EP 2230380 A2, DE 102009013527 A1, Herrenknecht, 2010). 현재 취하 또는 포기된 상태인 것으로 보아 기존 특허에 비해 특허성을 인정받지 못하였거나 상용화에 성공하지 못하였기 때문으로 분석된다.



Fig. 8. Design method of helical segment (DE 102009013527 A1, EP 2230380 A2, Herrenknecht, 2010)

동 회사는 2019년 세그먼트가 아닌 장비의 연속굴착 방법에 대한 특허를 미국, 유럽, 중국 등 9개국에 출원하였고, 현재 미국 특허로 2021년 등록된 상태이다(Fig. 9, US 2021-0032991 A1, Herrenknecht, 2021). 해당 특허는 헬리컬 세그먼트를 이용한 방법이 아닌 일반 세그먼트를 통해서 가능한 연속적으로 굴진하는 semi-continuous TBM 기술이다. 따라서 세그먼트에 대한 기술을 제외하고 TBM 장비구성과 운영방법에 대한 권리를 주장하는 것이 주된 특징이다. 이 기술은 2021년 영국의 런던과 버밍엄의 3 km 터널시공에 적용되어 실증에 성공한다(The Construction Index, 2021). 그래서 이 기술의 개발시기부터 연속굴착 TBM 기술이 다시 주목받기 시작하였다. 미국에서 제안된 헬리컬 세그먼트 체결방식(US 10746022 B2, Fig. 10)도 이러한 추세에 연장선에 있다고 추정된다.

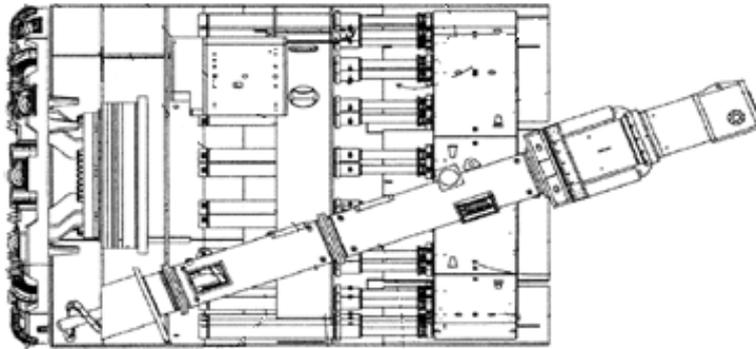


Fig. 9. Tunnel equipment for continuous excavation (US 2021-0032991 A1, Herrenknecht, 2021)

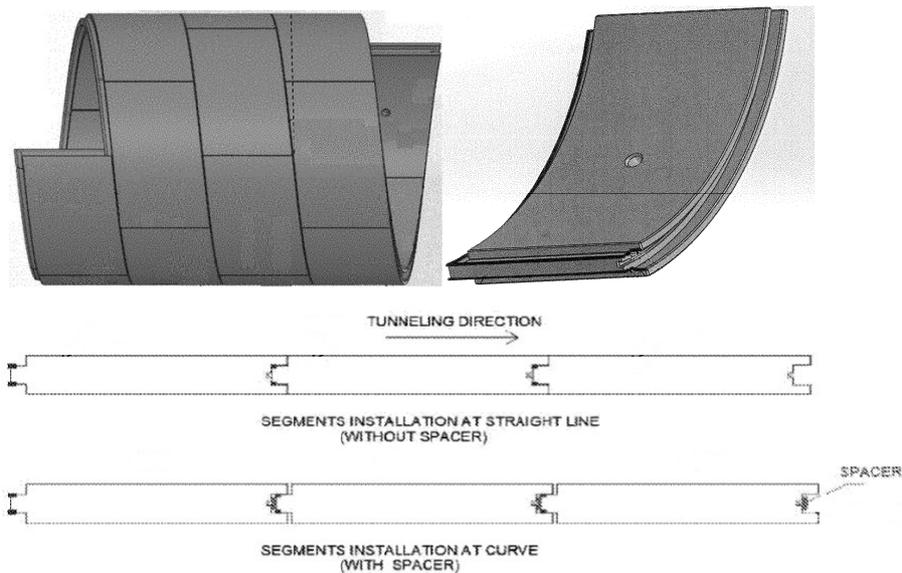


Fig. 10. Helical segment conceptual diagram for TBM continuous excavation (US 10746022 B2, TopEng, 2019)

3.2 육각형 세그먼트 방식

일본에서는 연속굴착 방식으로 육각형 세그먼트를 이용한 방법이 주로 발명되어왔다. 한 방법은 정육각형 및 길쭉한 팔각형을 이용한 벌집모양의 허니콤(Honeycomb) 방식과 사각형 세그먼트 모서리를 커팅한 형태(부분 육각형)를 이용한 방식, 2가지로 나뉜다.

3.2.1 허니컴 방식

허니컴 방식은 연속굴착 방식을 위해 일본에서 최초로 고안한 아이디어이다(Fig. 11). 당초 정육각형 모양으로 개발되어서 전체의 50%의 추진책만으로 반력을 제공하는 개념이었다(JP 1998-068297 A, JFE Metal Products, 1998, NGK Insulators, 2007). 그런데 경사진 부분에 추진책을 밀착하지 못하기 때문에 좀 더 길쭉한 8각형 모양을 적용해서 전체의 50% 이상의 추진책을 사용하는 방법으로 변화시킨 특허가 발명되기도 했다(Fig. 12, CN 205618171 U, Southwest Jiaotong University, 2016).

이 방법의 첫 번째 단점은 세그먼트 접촉면이 6개로 증가하므로, 조립 시 차수재(가스킷) 설계가 복잡하다는 것이다. 두 번째 단점은 단순한 6각형 형태(일본)로 진행하게 되면 추진책의 스트로크가 1.5배 이상 길어지게 되고, 8각형으로 하면 세그먼트의 수가 많아지는 동시에 접촉면의 수가 8개로 지나치게 증가하는 문제가 발생하는 점이다. 또한, 아직까지 허니컴과 8각 세그먼트 역시 터널곡선 부분의 설계방법이 제시된 바가 없다는 것이 세 번째 단점이다. 이 때문인지 실증시험 이후 여러 가지 문제점이 제기되어 상용화에 난항을 겪은 것으로 알려져 있다(Science & Technology Strategy Institute, 2021).

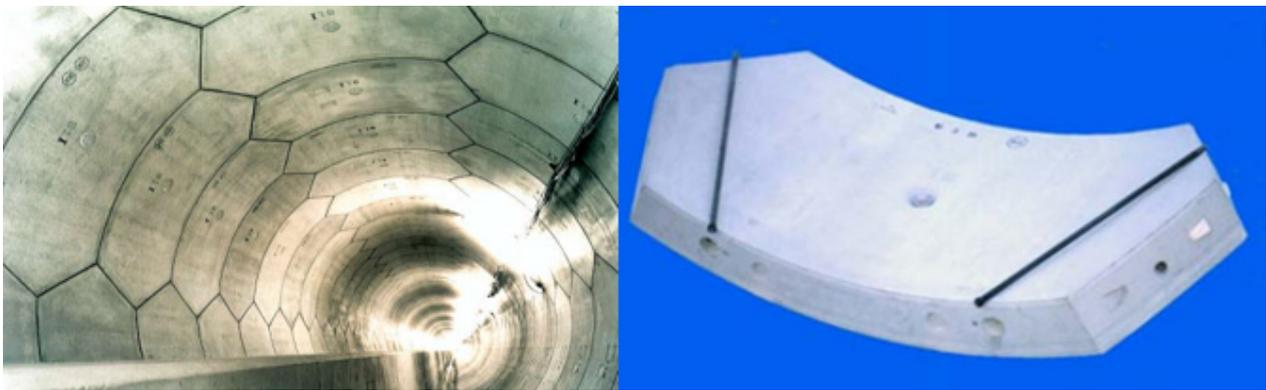


Fig. 11. Honeycomb segment conceptual diagram for continuous excavation (NGK Insulators, 2007)

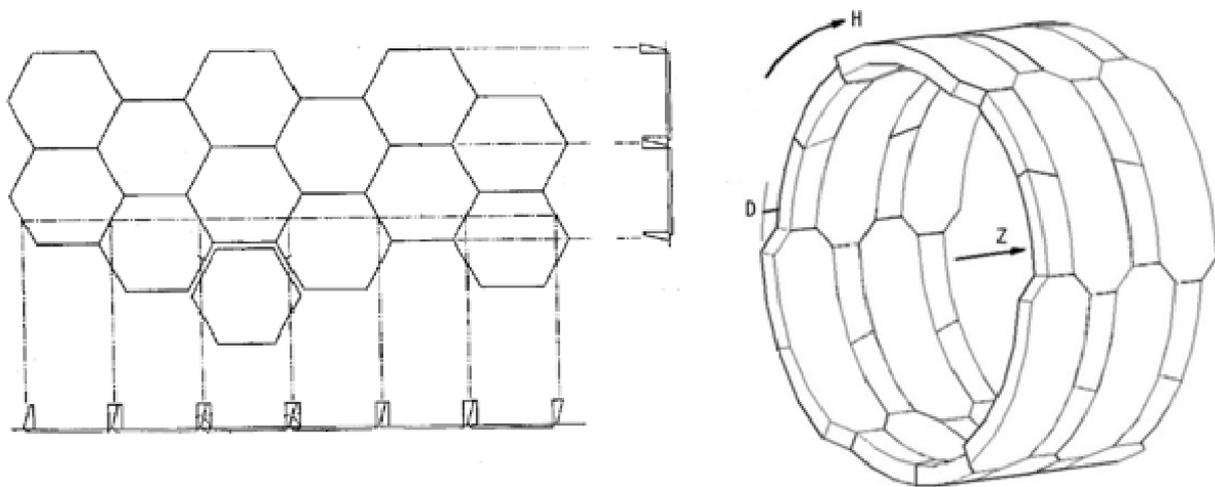


Fig. 12. Honeycomb segment conceptual diagram for continuous excavation (JP 1998-068297 A, JFE Metal Products, 1998, CN 205618171 U, Southwest Jiaotong University, 2016)

3.2.2 부분 육각형 세그먼트 방식

부분 육각형 세그먼트 방식도 일본에서 발명된 것으로 사각형 세그먼트의 대각선 모서리 부분을 자른 형태를 가지고 있다. 모서리 부분을 작게 커팅하면 Fig. 13과 같고(JP 1999-044195 A, IHI Construction Materials, 1999, JP 1998-153097 A, Mitsui E&S Holdings, 1998), 길고 완만하게 형성하면 Fig. 14와 같은 형태를 가진다(JP 1992-057598 U, Taisei Corporation, 1990). 결과적으로 어떤 형태이든 비스듬한 육각형 모양이 된다. 하지만, 전자(Fig. 13)는 터널상부의 상재하중과 추진잭의 수평방향 추력에 의해 발생하는 전단하중에 저항하는 안전성이 저하되는 문제점이 있다. Fig. 15와 같이 내력이 작용하는 옹벽은 반드시 막힌줄눈쌓기를 통해 벽체를 형성하는데, TBM 세그먼트도 터널의 상재하중과 TBM추력에 안정성을 보증해야 하므로, 막힌줄눈쌓기를 통해 세그먼트를 체결한다. 결과적으로 상기 방법은 TBM 굴진중 세그먼트의 안정성을 완전히 담보하지 못하는 방법이라 할 수 있다.

이에 대한 해결책으로서 Fig. 14처럼 모서리 부분을 길게 하면 막힌줄눈쌓기가 가능해진다. 하지만, 추진잭이 접촉할 수 있는 세그먼트의 수직면이 감소하여 추진잭을 절반밖에 운용하지 못하게 되는 단점이 있다. 예를 들어 Fig. 14에서 추진잭이 추력을 가할 수 있는 면은 수직면 1개밖에 없고, 경사면은 추진잭 접촉시 미끄러짐의 우려가 있다. 경사진 부분을 제외하고 수직면에만 추력을 가해야 하므로, 추진잭 가용 숫자가 감소하게 된다. 이 경우, 추진잭 가용률이 50%로 감소되어 TBM 굴진성능 저하를 유발하는 문제가 발생한다. 이 때문에 부분 육각형 세그먼트 방식도 상용화에 완전히 성공하지 못한 것으로 추정된다.

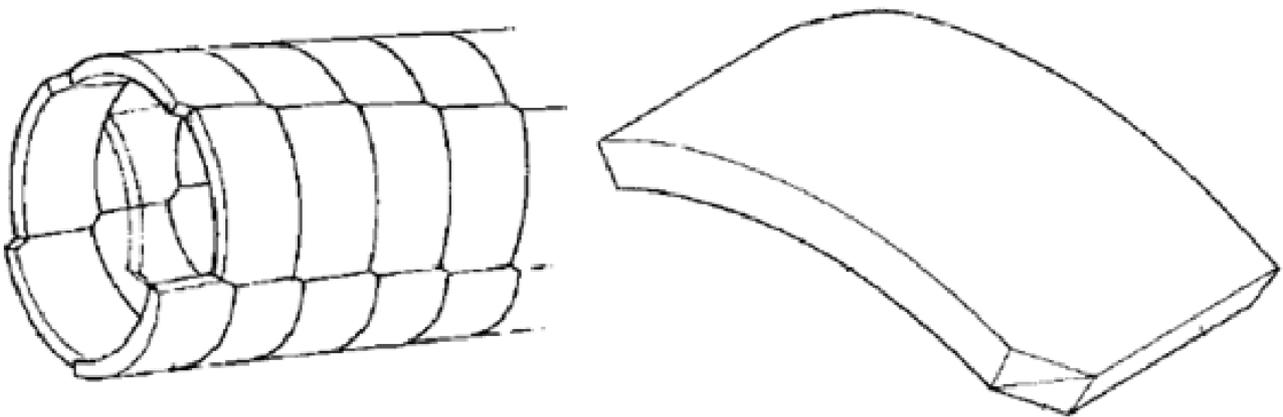


Fig. 13. Partial hexagonal segment (JP 1999-044195 A, IHI Construction Materials, 1999, JP 1998-153097 A, Mitsui E&S Holdings, 1998)

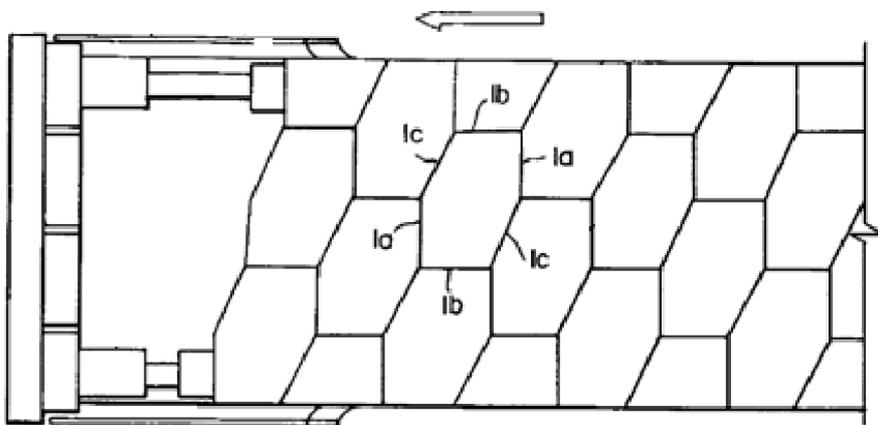


Fig. 14. Inclined stepped hexagonal segment (JP 1992-057598 U, Taisei Corporation, 1990)

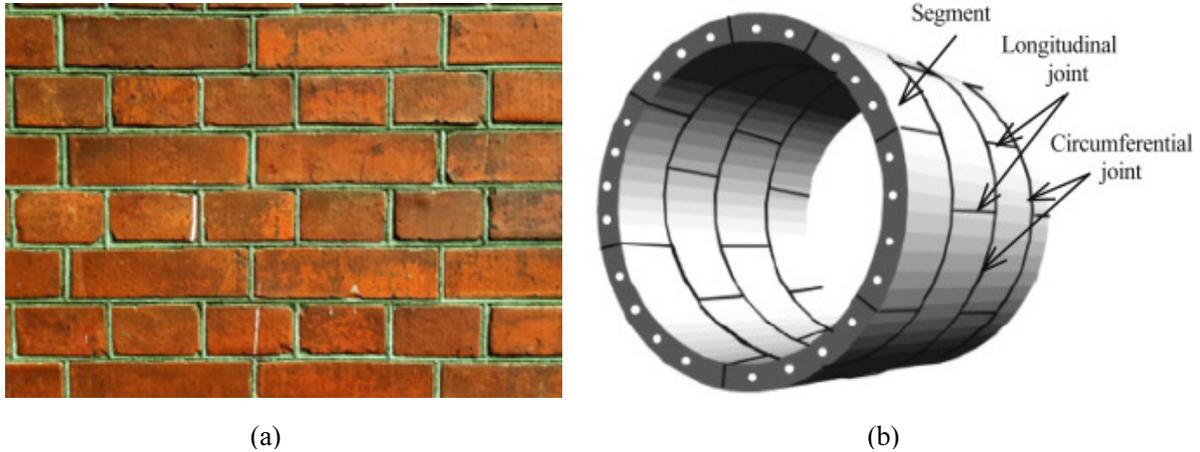


Fig. 15. Stacking of clogged joints (a) brickworks, and (b) segment assembly

3.3 기존 세그먼트 방법(독일 방식 semi-continuous)

앞서 설명한 바와 같이, 독일의 Herrenknecht 사는 2021년 자체적으로 발명한 semi-continuous 굴착방식을 이용하여 영국의 쌍 굴터널을 성공적으로 굴진하였다. 이 방법은 국내에 Long jack method로도 알려져 있는데, 기본 개념은 Fig. 16과 같다. 기존 실드 TBM은 이렉터가 세그먼트의 1개의 링을 체결되는 동안 장비 구동부 전체가 정지한다. 따라서 굴진-정지-굴진이 이분법적으로 반복된다. 이에 반해 신규 공법은 비교적 긴 추진축을 사용하여 세그먼트가 체결되는 일부 시간에도 추진축을 가동시켜 굴진 정지시간을 최소화하는 방법이다.

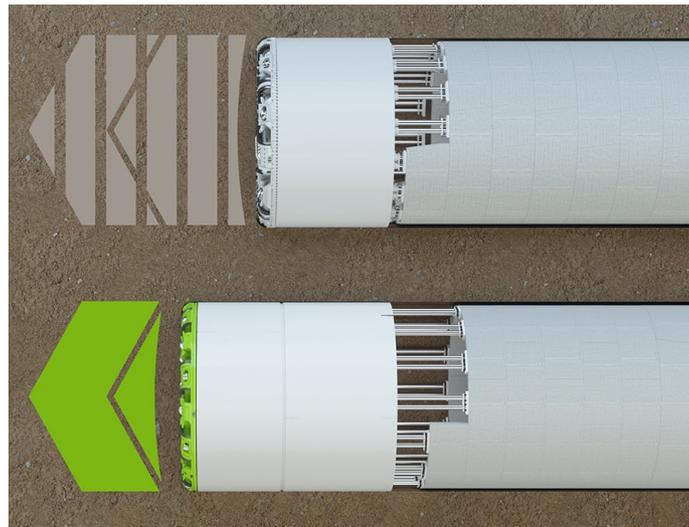


Fig. 16. Conceptual diagram comparing conventional Shield TBM and semi-continuous method (Herrenknecht, 2022)

이 방법의 세부기술은 아직 구체적으로 공개된 바 없다. 하지만, 현재까지 일부 발표된 바에 따르면(Wehrmeyer, 2022), 첫 번째 바닥면 세그먼트와 키 세그먼트가 체결되는 중에만 전체 추진축을 정지시키고, 측면부 세그먼트가 체결되는 동안에는 굴진을 진행한다고 한다.

Herrenknecht사에서 발표한 자료를 바탕으로 해당 기술의 추진책 운영방법을 일부 추정해 보았다. Fig. 17은 기존 쉴드 TBM이 직진상황에서의 추진책의 개별 추력 및 합력 중심점은 녹색으로 표시하고 있고, semi-continuous 방식의 개별 추력 및 합력 중심점은 검은색으로 표시되어 있다. TBM에서 추진책이 원형으로 배열되고, 각 추진책으로 추력을 가하면 합력 중심점(CoT: Center of thrust)이 생긴다. TBM 직진방향을 z축, 수직방향을 y축, 수평방향을 x축으로 할 때, 추진책 추력 및 힘이 작용하는 형태를 Fig. 18에 자세히 나타냈다. 직진 시 신규 방식의 합력 중심점은 기존 TBM의 직진 조건과 동일하다. 14개의 추진책에서 최초 조건인 최하부 추진책7번, 8번 추진책 추력이 “0” 일 때, 일반굴착조건과 동일한 굴착력과 CoT 위치를 유지하기 위해서 각 방향 합력과 x축, y축 모멘트는 기존과 동일해야 한다(Fig. 18).

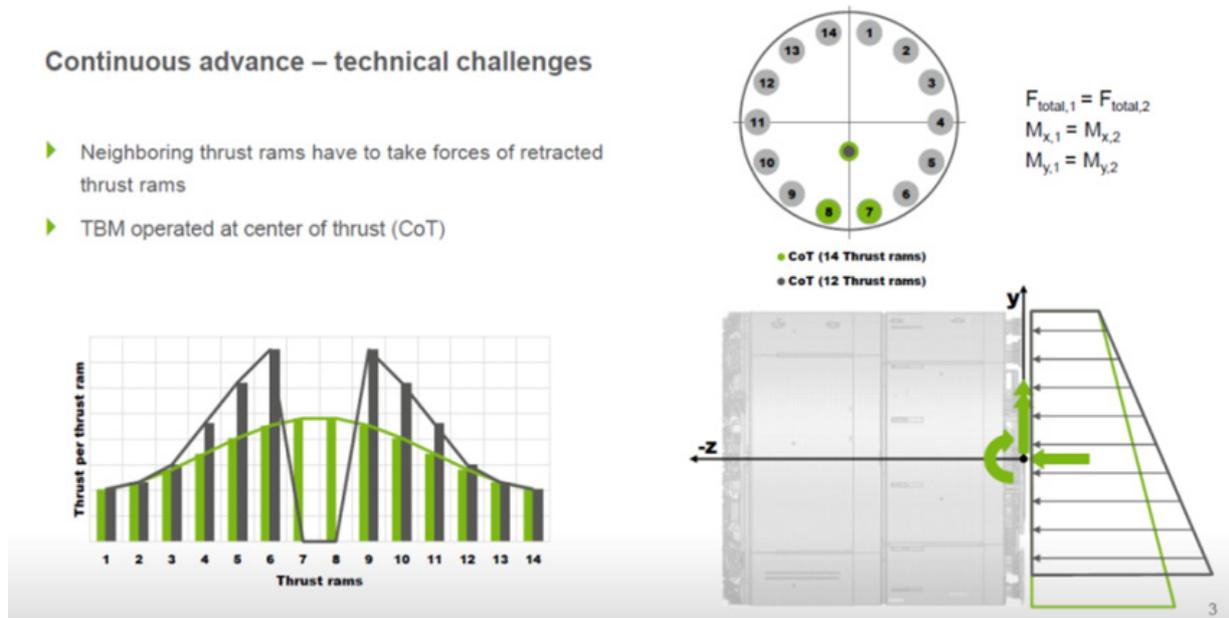


Fig. 17. Thrust force redistribution for semi-continuous advance of shield TBM (Wehrmeyer, 2022)

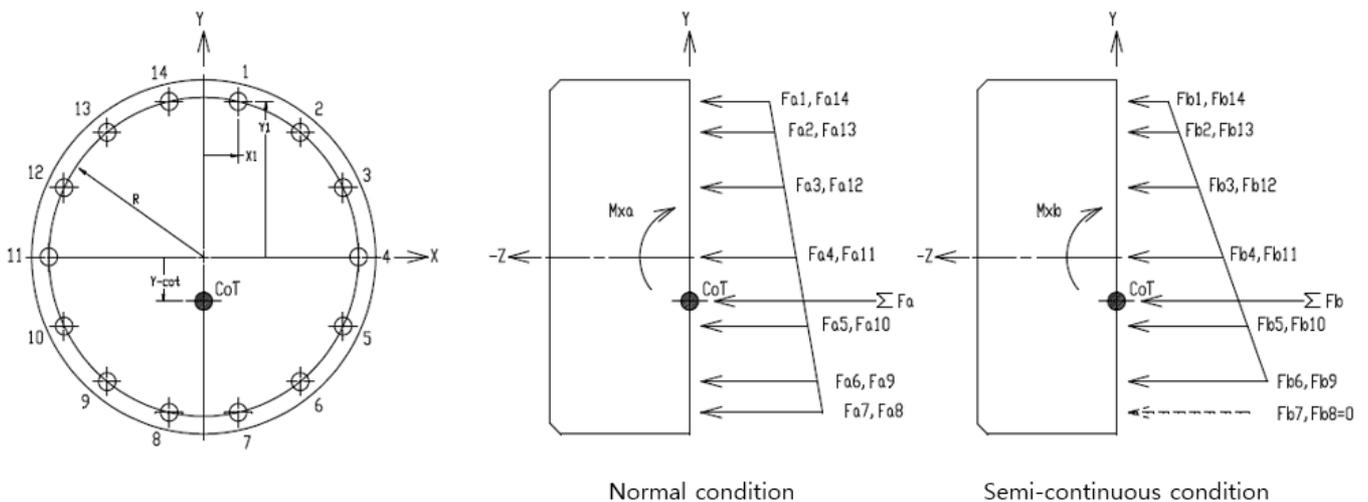


Fig. 18. Analysis of the pressure in the semi-continuous method

이 조건으로 신규 방식의 추진잭 운영조건 중 1가지인 Fig.17의 그래프를 분석 및 디지털이징하여 다시 그리면 Fig. 19과 같다. 결과적으로 동일한 합력지점이 되기 위해서 쉬고 있는 7, 8번 추진잭의 추력을 다른 추진잭이 보상해줘야 하는데, 이를 위해 7, 8번 추진잭의 양측에 인접한 추진잭(No. 6, 9) 은 기존 방법의 약 150%이상 초과하는 추력을 제공해야 했다. 따라서 연속굴착 방식을 적용하기 위해서는 추진잭의 길이를 연장할 뿐만 아니라 최대압력도 상향 조정해야 함을 알 수 있었다. 결과적으로 증가한 추진력에 저항하기 위하여 연속굴착식 세그먼트는 압축강도도 50% 이상 향상되어야 하는 것으로 조사되었다.

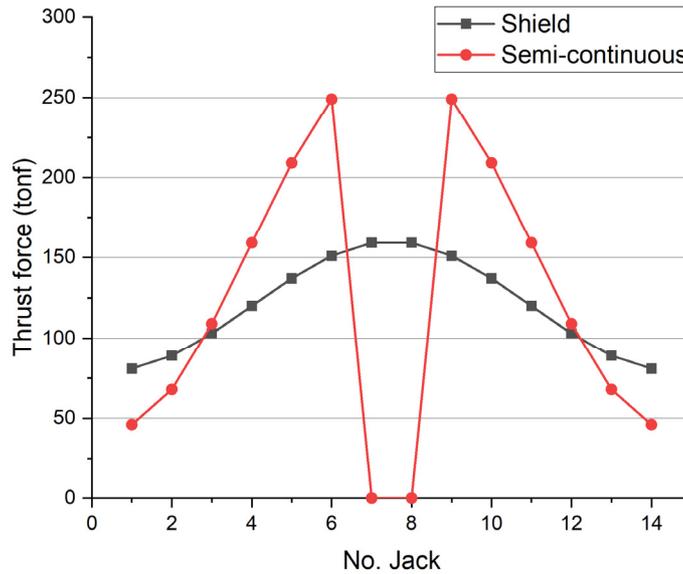


Fig. 19. Estimation of the operation method for the semi-continuous thrust jack

4. 결론

TBM 연속굴착 기술은 세그먼트 체결 중에도 지속적으로 터널을 굴진할 수 있는 방식으로 1960년대부터 현재까지 많은 특허와 아이디어가 출원되고 제안되어왔다. 만약 개발에 성공한다면, 쉴드 TBM의 실굴진율을 파격적으로 향상시킬 수 있기 때문이다. 본 보고는 연속굴착 기술에 관련된 선행 특허 문헌들을 분석하였다.

미주에서는 주로 헬리컬 세그먼트를 이용한 방식으로 연속굴착 방법을 제안하였으나 아직 실증시험이 진행되거나 현장사례가 조사되지 않았다. 일본은 육각형 세그먼트를 이용한 방법을 개발하여 실증시험까지 진행하였으나 아직 상용화에 성공하지는 못한 것으로 추정되었다. 독일은 기존의 링타입 세그먼트를 이용한 부분적인 연속굴착(semi-continuous) 방법을 개발하여 영국현장에 실증에 성공하여 상용화 단계에 도달하였다. 이는 쉴드 TBM 연속굴착에 대한 최초 성공사례로서 앞으로 TBM 관련 전문가들의 관심을 유발할 것으로 예상된다. 국내에서도 연속굴착 TBM 관련 연구사업이 진행중이므로(Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2022), 기존의 성공사례를 면밀히 분석하고, 차별화하여 독자적인 연속굴착 방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Choi, Y.T., Lee, D.G., Kim, M.G., Oh, J.Y., and Cho, J.W., 2022, Continuous Excavation Type TBM Parts Modification and Control Technology for Improving TBM Performance, *Tunnel & Underground Space*, 32(6), 345-352.
- Dalmaso, M., 1978, Helicoidal mine tunnel lining - uses arch blocks assembled by cylindrical shield and held together by rods and ties cemented to ground, French Patent, FR-2435599-A1.
- Taisei Corporation, 1990, Segment, Japanese Patent, JP-1992-057598 (1992.05.18.).
- Herrenknecht AG, 2010, Reinforcement segment, reinforcement segment assemblies and cavity lining, European Patent, EP 2230380 A2 (2010.09.22.).
- Herrenknecht Aktiengesellschaft, 2021, Device and Method for Continuously Driving a Tunnel, US Patent, US 2021-0032991 A1 (2021.02.04.).
- Herrenknecht, 2022, Trade fair start made to measure: Herrenknecht AG wins bauma Innovation Award 2022.
- IHI Construction Materials Co Ltd, Taisei Corp, 1999, Segment, Japanese Patent, JP-1999-044195A.
- JFE Metal Products & Engineering Inc, 1998, Composite material, Japanese Patent, JP 1998-068297 A.
- Cho, J.W. and Cha, H. 2023, Introduction of Shield TBM Prior Technology and Development Case, *Jouran of the Korean Society of Civil Engineers*, 71(6), 42-49.
- Kunststoffverarbeitung Voss, 1966, Method and apparatus for preparing a lining by cross-sectionally circular stud or pits, Deutsches Patent, DE 01229961 (1966.12.08.).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2022, Consecutive Excavation Technological Development Project of Tunnel Boring Machine (Host organization: Korea University Research Institute Company).
- Mitsui E&S Holdings Co Ltd., 1998, Continuous excavation-response type segment and conduit created with the segment, Japanese Patent, JP 1998-153097 A (1998.06.09.).
- NGK Insulators, Ltd., 2007, Honeycomb segment and honeycomb structure using the honeycomb segment, US patents.
- Spiroll Corp Ltd., 1974, Method of Forming Spiral or Helical Tunnels and Sections Therefor, Canadian Intellectual Property Administration, CA 0955764 A (1974.10.08.).
- Southwest Jiaotong University, 2016, Tunnel segment lining cutting structure that octagon and quadrangle segment ring were assembled to transition, Canadian Intellectual Property, CN 201620410115.2U.
- Science & Technology Strategy Institute, 2021, Consecutive Excavation Technological Development Project of Tunnel Boring Machine, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 136-155.
- TopEng INC., Jamal Rostami Engineering Services, 2019, Helical Segmental Lining, World Intellectual property organization.
- The Construction Index, 2021, News/UK/First HS2 tunnelling machine launches, Today sees the launch of the first tunnel boring machine on the £100bn+ HS2 project.
- Wehrmeyer, G., 2022, Herrenknecht Pioneering Underground Technologies Semi-Continuous Advance, Online seminar of consecutive TBM project.