

TECHNICAL NOTES

NATM 터널의 굴착면 전방 지질 평가를 위한 대구경 심발공 탐사 시스템 개발 및 적용 사례

김민성¹, 정진혁², 이제겸², 박민선², 박정현³, 이승원^{4*}

¹한양대학교 자원환경공학과 박사과정, ²한양대학교 자원환경공학과 석사과정, ³한양대학교 기계공학과 박사과정, ⁴한양대학교 자원환경공학과 교수

Development and Application of Large-diameter Cut-hole Exploration System for Assessment of the Geological Condition beyond NATM Tunnel Face

Minseong Kim¹, Jinhyeok Jung², Jekyum Lee², Minsun Park², Jeonghyeon Bak³, and Sean Seungwon Lee^{4*}

¹Ph.D Candidate, Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University

²Master's Course, Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University

³Ph.D Candidate, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

⁴Professor, Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University

*Corresponding author: seanlee@hanyang.ac.kr

Received: February 16, 2021

Revised: February 22, 2021

Accepted: February 23, 2021

ABSTRACT

Recently, the development of underground space has been accelerated with rapid urbanization, and it is significantly important for safe construction to accurately understand the geological conditions of the section when excavating rocks. In this paper, a boring alignment tracking and geological exploration system have been developed to identify the geological conditions beyond the excavation face by utilizing a MSP method that bores a large empty hole to reduce blast-induced vibration. The major advantage of the proposed exploration system is that we can obtain the ground condition of 50 m ahead of the excavation face through exploration along blast cut-holes drilled for the NATM tunnel construction. In addition, we introduce several case histories regarding the assessment of the geological conditions beyond the tunnel face by monitoring the inside of large empty holes using the proposed hole exploration system.

Keywords: NATM tunnel, MSP method, Large-diameter cut-hole, Ground investigation, Geological condition beyond excavation face

초록

최근 도시화가 가속화됨에 따라 지하공간 개발을 위한 굴착공사가 지속적으로 이루어지고 있으며, 암반 굴착 시 해당 구간의 지질 상태를 정확히 파악하는 것은 안전한 시공을 위해 매우 중요하다. 본 논문에서는 터널 발파 진동을 저감시키기 위해 대구경 무장약공을 천공하는 MSP 공법을 활용하여 굴착면 전방의 지질 특성을 파악하기 위해 천공경로 및 지반탐사 복합시스템을 개발하였다. 제안된 탐사 시스템은 NATM 터널 공사를 위해 천공된 대구경 심발공을 활용해 굴착면 전방 50 m 구간의 지질 정보를 획득할 수 있다는 큰 장점이 있다. 또한, 제안된 탐사 시스템을 현장에 적용하고 대구경 무장약공 내부를 모니터링하여 터널 굴착면 전방의 지질 상태를 평가한 사례를 소개한다.

핵심어: NATM 터널, MSP 공법, 대구경 심발공, 지반 탐사, 터널 전방 지질 예측



1. 서론

도심지의 활발한 개발로 인해 지상이 포화됨에 따라 지하공간의 개발 및 활용이 매우 중요해졌으며, 지하공간 개발에 따른 환경 및 안전문제에 대한 지속적인 노력이 요구되고 있다(Baek et al., 2000, Jung, 2021). 암반 굴착을 통한 지하 구조물의 안전한 시공을 위해서는 해당 구간의 지질 데이터를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하며, 일반적으로 지질정보 파악을 위해 크게 설계단계 지반조사와 시공 중 지반조사로 나누어 수행된다. 설계단계에 이루어지는 지반조사는 최초 설계를 위한 지질 데이터 확보를 위해 공사 전 해당 구간에 대해 전반적인 조사가 이루어지며, 시공 중 이루어지는 지반조사는 설계단계에서 넓은 범위에 대해 파악된 지질 정보의 불확실성으로부터 발생 가능한 위험 요소를 보다 세밀하게 파악하고 이에 대처할 목적으로 수행한다(Kim et al., 2003). 안전한 암반 굴착을 위해 여러 지반조사를 시행했음에도 시공 과정에서 발생하는 응력 재분배로 인한 지반의 변위 발생이나 예상치 못한 파쇄대, 불연속면 상태, 다량의 지하수 유출 등으로 인해 문제가 발생된 사례들이 있다(Shin et al., 2007, Park et al., 2013, Kim and Lee, 2020). 시공 중 발생할 수 있는 사고를 예방하기 위해 선진보링에 의한 암반예측 기술, 탄성파 탐사(TSP/HSP) 등의 추가적인 지반조사 기법들이 적용되고 있으나(Lee et al., 2001, You and Baek, 2004), 이들을 활용하기 위한 추가적인 작업시간 및 비용이 소요된다는 단점이 있다(Kim et al., 2006, Kim et al., 2015).

NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법을 활용하여 암반을 굴착하는 터널 건설 현장에서는 암반 발파 시 발생하는 진동을 저감시키기 위해 심발 공법을 적용한다. MSP(Multi-setting Smart-investigation of the ground and Pre-large hole boring) 공법은 터널 심발부에 대구경 무장약공을 천공하고 이를 추가적인 자유면으로 활용하여 진동을 저감시키는 심발 공법으로, 본 공법은 382 mm 직경의 대구경 해머비트를 사용하여 1회 천공 시 약 50 m 깊이에 달하는 장거리를 천공한다(Kim et al., 2020). 터널 심발부에 대구경 무장약공을 활용하는 연구들은 대부분 발파 진동 저감 효율에 중점을 두고 있으며(Lee, 2008, Beak et al., 2012, Choi et al., 2016), 진동 저감 뿐만 아니라 천공이 완료된 홀을 활용하는 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 터널 발파 진동 저감을 위한 MSP 공법 적용 시 천공이 완료된 약 50 m 깊이의 대구경 무장약공을 활용해 공벽 관찰을 통한 지질평가와 특이 구간을 탐사 등을 목적으로 천공경로 및 지반탐사 복합시스템을 개발하였다. 또한, 발파 굴착 시 발생하는 진동을 저감시키기 위해 MSP 공법이 적용된 국내 터널 건설 현장에서 개발된 천공경로 및 지반탐사 복합시스템을 적용하여 굴착면 전방의 지질을 평가한 사례를 소개한다.

2. MSP 공법

MSP(Multi-setting Smart-investigation of the ground and Pre-large hole boring) 공법은 터널 발파 굴착 시 발생하는 진동을 저감시킬 목적으로 심발부에 대구경 무장약공을 천공하고 이를 자유면으로 활용하여 진동을 저감시키는 공법이며, 터널 현장에서 시공 중인 모습을 Fig. 1에 나타내었다. MSP 천공 장비는 유압식 아웃트리거를 이용해 자유롭게 세팅할 수 있으며, 실시간 천공 데이터 모니터링 시스템을 탑재하고 있어 예측이 어려운 막장 전방의 지질변화에 즉각 대응하여 천공 효율을 증대시키고 장비의 망실을 최소화할 수 있다(Kim et al., 2020).

본 공법은 전체 천공 소요 시간과 터널 굴착 사이클 등을 고려하여 1회 천공 시 통상적으로 50 m를 천공하며, 현장 여건에 따라 10-60 m 깊이의 천공이 이루어진다. 또한, 본 공법은 통상적으로 단일천공(Single-MSP)을 통해 진동을 저감시키는데, 해당 발파 구간의 진동 허용치와 목적에 따라 2공 이상의 다중천공(Multi-MSP)이 적용될 수 있다.



Fig. 1. Field application of the MSP machine

MSP 천공을 통한 대구경 천공 홀 내부 환경은 천공 대상 암반의 지질학적, 역학적 특성 등에 따라 다양한 특성을 보일 수 있으며, Fig. 2는 서로 다른 지역에 위치하여 각기 다른 특성을 보이는 천공 홀 내부 이미지를 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 보통암 이상의 선암에서 천공된 홀 내부 사진이고, Fig. 2(b)는 파쇄대가 많이 존재하는 연암 이하의 암질에서 천공된 홀 내부 사진을 보여주고 있다. 이와 같이 암반의 특성에 따라 발생 가능한 다양한 천공 홀 내부 환경에 최적화된 계측 장비를 개발하고자 차량형 기동 방식과 내벽 지지형 기동 방식을 채택한 계측 장비 시제품을 개발하였는데, Fig. 2(b)와 같이 천공 홀 내부의 내부 공벽면의 거칠기 양상에 따라 차량형 계측 장비의 불규칙한 기동을 보였다. 특히, 파쇄대가 많이 존재하는 풍화암 수준의 암질에서는 파쇄 된 암반과 주입된 물로 인해 진흙 상태의 슬러지가 생성되어 기울기 계측 데이터의 오차가 누적되어 경로 추적에 제한이 있었으며, 불규칙한 촬영 영상의 품질로 인해 향후 이미지 처리에 제한이 있을 것으로 판단되었다.



(a) Good condition



(b) Poor condition

Fig. 2. Types of the MSP holes

3. 천공경로 및 지반탐사 복합시스템 개발

발파 시 발생하는 진동을 저감시키기 위해 적용되는 MSP 공법의 대구경 무장약공 천공이 완료된 50 m 깊이의 홀 내부를 기동하여 전체적인 공벽 영상을 촬영할 수 있도록 Fig. 3과 같이 내벽 지지형 천공경로 및 지반탐사 복합시스템을 개발하였다. 본 장비는

www.kci.go.kr

크게 머신비전 카메라, 9축 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서, 플랫폼 링 조명 등이 내장되어 있어 천공 홀 내부의 촬영과 전체 천공 경로를 추적하기 위한 계측부, 각 바퀴에 부착된 모터를 통해 장비를 전·후진시키는 기동부, 그리고 전선 드럼과 모터 등 계측 장비와 부속 장비에 전기를 공급하는 제어부로 구성되어 있으며, 장비의 주요 성능은 Table 1에 나타내었다.

내벽 지지형 기동 방식의 특징은 주행 바퀴와 몸체를 사이에 위치한 현가장치(서스펜션)를 통해 공벽 방향으로 일정 압력을 가해 모든 바퀴가 홀의 벽면에 밀착되어 주행하고, 반대로 천공 홀 벽면의 불규칙한 거칠기로 인한 형태적 변화에 대응하여 충격을 흡수하고 계측 장비의 몸체가 중심에 위치하여 이동할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 파쇄대로 인해 특정 구간에 공동이 발생되어 1~2개의 주행 바퀴가 공벽으로부터 탈락되어도 나머지 주행 바퀴들이 공벽을 밀착하고 있어 불량한 계측 환경에서도 천공 홀의 중심에 위치하여 정상적인 기동과 데이터 확보가 가능하도록 한다. 천공 홀 내부에는 지하수가 존재할 수 있으며, 상황에 따라 계측 장비가 일부 혹은 완전 잠수 상태로 천공 홀 내부를 기동해야 하는 환경에 놓일 수 있다. 따라서 최악의 계측 환경을 고려하여 15 cm-1 m 깊이의 물속에서 30분 이상 침수시켜 방수 성능을 테스트하는 IPX 7 등급 수준의 시험 환경에서 계측장비를 1시간 이상 침수시켜 방수 성능을 자체적으로 검증하였다.



Fig. 3. Borehole alignment tracking and geological exploration system

Table 1. Specifications of the borehole alignment tracking and geological exploration system

Categories	Values	
Measuring equipment	Total length	117 cm
	Movement method	An electric movement system
	Frame rate	35 FPS (Minimum 1 FPS)
	Camera resolution	2048 × 1536
	Controller	Window based specialized software (MSP Analysis Platform, MAP)
Survey ranges	Length	Maximum 70 m
	Diameter	260 – 400 mm
	Time	30 min per hole (50 m)

천공경로 및 지반탐사 통합시스템 운용 시 계측부, 기동부, 제어부를 통합적으로 컨트롤할 수 있도록 MSP Analysis Platform (MAP) 소프트웨어를 개발하였으며, 개발된 소프트웨어의 인터페이스 및 현장 활용 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 본 소프트웨어

는 각 장비들에 활용되는 부품들 간의 속도 비를 사전에 계산하여 계측 장비의 기동 속도 변화에 따라 전선 분배기와 전선 드럼의 기동 속도가 통합적으로 조절될 뿐만 아니라 머신비전 카메라를 통해 촬영되는 천공 홀 내부 영상을 실시간으로 모니터링 할 수 있으며, IMU 센서를 통해 계측되는 기울기 데이터를 실시간으로 계산하여 전체 천공 경로를 확인할 수 있다.

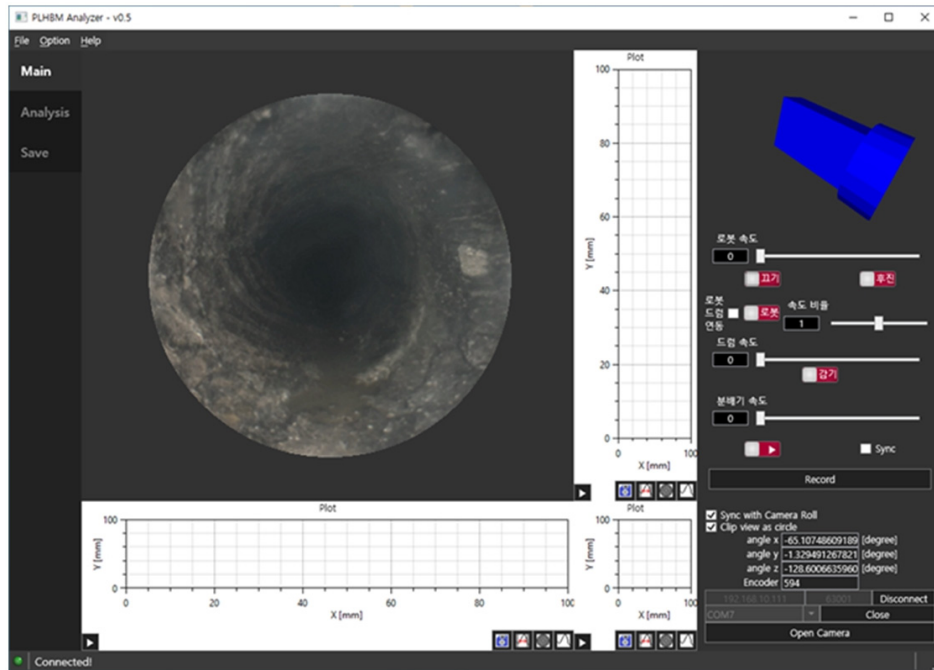


Fig. 4. MSP Analysis Platform (MAP)

4. 현장 적용

새롭게 개발된 천공경로 및 지반탐사 복합시스템은 발파 진동 저감을 위해 대구경 무장약공이 적용된 터널 발파 굴착 구간 중 굴착면 전방의 지질정보를 획득하여 암질이 불량할 것으로 추정되는 구간을 사전에 파악함으로써 안전성과 시공성을 확보할 수 있는 기초자료를 제공하는 데 그 목적이 있다. 천공경로 및 지반탐사 복합시스템의 현장 적용은 크게 6단계로 구분할 수 있으며, 전체적인 작업 흐름표시도를 Fig. 5에 나타내었다. 먼저, 총 천공장, 종단구배, 암질 등 천공 홀 내부 촬영이 진행될 대상 환경을 사전에 파악하여 작업 계획을 수립한다. 동시에 천공 홀 내부의 먼지, 수증기, 슬러지 등을 제거하여 계측 장비의 기동과 데이터 획득에 적합한 환경을 제공할 수 있도록 천공 홀 내부 청소가 이루어진다. 그 후, 각 장비들의 사전 테스트를 통해 이상 유무를 파악하고 홀 내부에 투입하여 관측이 이루어진다. 계측 장비의 기동과 동시에 실시간으로 전체 천공 경로를 확인할 수 있으며, 공내 촬영 영상 또한 실시간으로 확인할 수 있다. 촬영 후 획득된 데이터들의 이상 유무를 파악하고, 필요 시 재촬영이 이루어질 수 있으며, 이상이 없을 경우 데이터를 추출 및 분석하여 굴착면 전방에 대한 구간별 지질평가가 이루어진다.

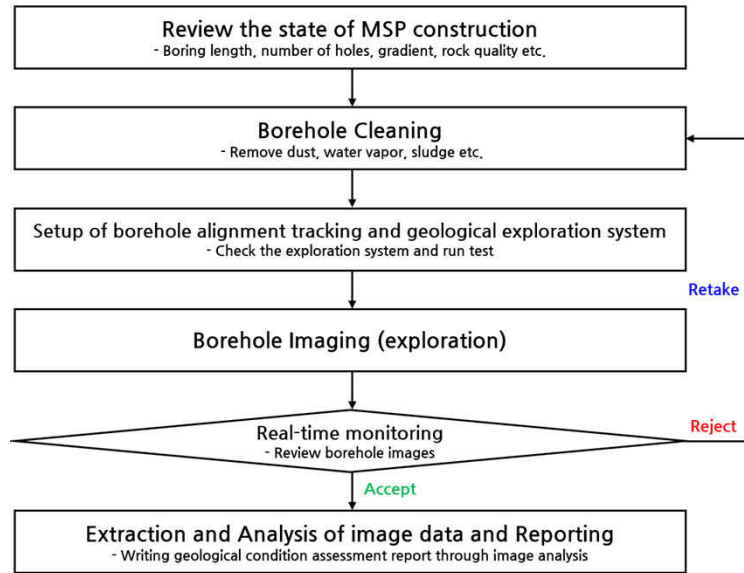


Fig. 5. Flow chart for observations

위와 같은 흐름표시도를 바탕으로 발파 시 발생하는 소음·진동 저감을 위해 MSP 공법이 적용된 국내 터널 건설 현장에서 천공 경로 및 지반탐사 복합시스템이 적용된 사례 중, 특수 구간에 대한 천공 홀 내부 이미지를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

Fig. 6은 전라도 지역의 고속국도 건설 현장에서 산악지대 비탈면 하부에 위치한 병설 터널 시점부(갱구부)에 MSP 공법이 각각 38 m 깊이로 1공씩 시공된 현장의 공내 촬영 이미지를 보여주고 있다. 해당 구간은 화강암과 천매암이 혼재되어 분포하고, 석영의 함량이 높은 석영편암이 존재하는 구간이었으며, 막장면과 천공 홀 내부 공벽의 육안 관찰 시 전반적으로 연암에서 풍화암 정도의 불량한 암질 상태를 보였다. 특히, Fig. 6(a)와 같이 상행선 방향의 터널 굴착 구간에서 천공된 총 38 m 중, 22 m 구간에서 홀 내부 상부에 대규모의 공동이 형성되어 있었으며, 하행선 방향의 18 m 구간에서는 Fig. 6(b)와 같이 천공 홀 우측 상부에서 대형 블록의 붕락이 발생된 것을 확인하여 해당 구간에 대형 절리 혹은 파쇄대가 존재하는 것을 사전에 파악할 수 있었다.



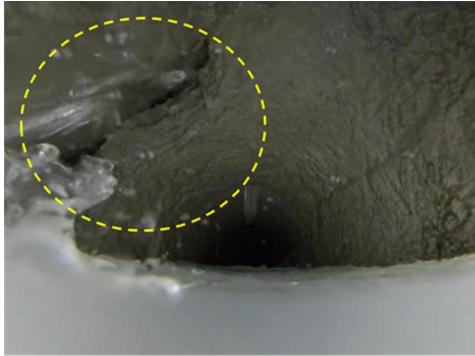
(a) Large fractured zone



(b) Rock block falling

Fig. 6. Observed images inside holes

Fig. 7(a)는 강원도 지역의 자원 이송 터널 건설 현장에서 시점부로부터 약 400 m 가량 굴착이 진행된 구간에서 적용된 MSP 공법의 천공 홀 내부 탐사 이미지를 보여주고 있다. 해당 구간은 석회암질 암반이 주를 이루고 있었으며, 막장면과 천공 홀 내부의 육안 관찰 시 보통암 이상의 견고한 암반으로 판단되었다. MSP 공법을 활용한 50 m 깊이의 대구경 무장약공이 총 1공 시공되었으며, 홀 내부 탐사 시 전반적으로 양호한 암반 상태를 보였으나, Fig. 7(a)와 (b)같이 총 50 m 깊이의 천공 구간 중 30 m와 31 m 구간에 다량의 지하수가 유입되는 것이 확인되어, 해당 구간에 대규모 절리를 통한 지하수 유동 통로 혹은 대수층이 존재할 가능성이 있는 것을 파악할 수 있었다.



(a) Groundwater inflow (first point)



(b) Groundwater inflow (second point)

Fig. 7. Observed images inside holes

5. 고찰

개발된 천공경로 및 지반탐사 복합시스템은 발파진동 저감을 위해 천공된 대구경 무장약공을 활용하여 홀 내부 공벽을 관찰하여 전체 천공 구간에 대한 지질 상태를 평가할 수 있었으며, 이를 통해 굴착면 전방의 지질 상태를 유추할 수 있었다. 개발된 천공경로 및 지반탐사 복합시스템은 굴착면 전방의 지질을 평가하기 위해 새로운 공정을 추가할 필요가 없다는 큰 장점이 있어 해당 시공사들로부터 본 시스템의 현장 적용이 지속적으로 요구되고 있다. 그러나 촬영된 영상을 관찰하여 대규모 절리, 파쇄대, 지하수 유입 구간 등의 특수 구간에 대한 대략적인 정보 획득은 가능하지만, 굴착면 전방 절리군의 분포 특성, 파쇄대와 풍화 정도 등을 보다 세부적으로 평가하기 위해서는 경험이 많은 엔지니어의 장시간의 영상 관찰과 현장 굴착면 맵핑(face mapping) 작업이 요구되고, 이들의 주관적인 분석 및 판단에 의존하게 되기 때문에 객관적이고 신뢰할만한 평가에 많은 어려움이 있었다.

따라서 현장 적용성을 증대시키기 위해서는 촬영된 전체 영상의 전처리를 통해 굴착면 전방의 지질을 보다 효율적이고 전문적으로 분석 및 평가할 수 있는 수평 천공 홀의 지질 평가통합 시스템의 개발이 요구된다. 이에 본 연구팀에서는 Fig. 8과 같이 촬영된 영상 기반으로 직사각형 형태의 이미지 변환과 거리별 이미지 추출을 통해 최종적으로 파노라마 형태의 이미지로 구현하기 위해 Python 기반의 내부 코드를 구성 중에 있다. Fig. 8은 서울시에 위치한 지하철 터널 건설 현장에서 수행된 사례를 보여주고 있는데, 획득된 영상 중 0-15 m 깊이에 해당하는 영상을 파노라마 형태로 재구성한 이미지이다. 천공 홀 입구로부터 천공 홀 내부로 진입할수록 천공 홀의 처짐에 의해서 바닥부에 지하수가 고여 있는 것을 확인할 수 있으며, 절리의 분포 특성 또한 확인할 수 있다. 향후 주요 절리군의 주향/경사, 파쇄대와 지하수 유입 구간 등 이상 구간을 자동으로 인식할 수 있는 기술을 개발하여 최종적으로 수평 천공

홀의 지질 평가 통합 시스템을 구축할 예정이며, 이를 통해 평가된 굴착면 전방의 지질 상태는 각 현장 상황별 적절한 굴착 및 지보 패턴 선정에 통해 효율적이고 안전한 터널 건설에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

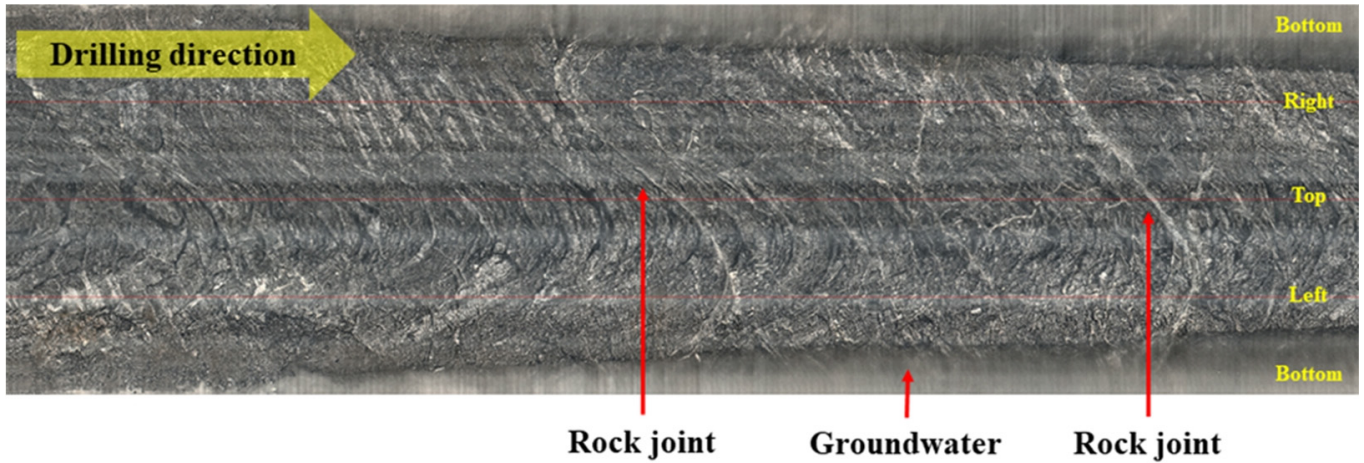


Fig. 8. Reconstructed panoramic image inside the horizontal hole

6. 결론

본 논문에서는 NATM 공법이 적용된 터널 건설 현장에서 발파 진동을 저감하기 위해 적용되는 MSP 공법의 대구경 무장약공을 활용하여 굴착면 전방의 지질을 평가하기 위해 개발된 천공경로 및 지반탐사 복합시스템을 소개하였으며, 이를 활용하여 MSP 공법이 적용된 국내 터널 건설 현장에서 굴착면 전방의 지질 상태를 평가한 사례를 소개하였다. 본 시스템은 발파 진동 저감을 위해 천공된 대구경 무장약공을 활용하여 천공 홀 내부를 탐사하기 때문에 굴착면 전방 지질을 평가하기 위한 추가적인 공정이 필요 없어 시간과 비용을 절감할 수 있다는 큰 장점이 있으며, 천공 홀 내부의 영상을 촬영할 뿐만 아니라 동시에 천공된 전체 경로를 계산하기 때문에 MSP 시공 직후 천공 품질을 확인할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 촬영된 영상에 대한 추출과 전체 천공 구간에 대한 세부적인 분석을 위해서는 엔지니어의 많은 장시간의 노력과 주관적인 판단이 요구되어, 본 연구팀에서는 보다 효율적이고 전문적인 굴착면 전방의 지질을 분석 및 평가하기 위해 촬영 영상을 파노라마 이미지로 구현하는 Python 기반의 내부 코드를 구성 중에 있다. 향후 구현된 파노라마 이미지로부터 절리의 주향/경사, 파쇄대와 지하수 유입 구간 등 이상 구간의 자동 인식과 분포 특성을 평가하는 수평 천공 홀의 지질 평가 통합 시스템을 구축할 예정이며, 이를 통해 평가된 굴착면 전방 지질 상태는 각 현장 상황별 적절한 굴착 및 지보 패턴 선정을 가능하게 하여 터널 공사의 효율과 안전성 측면에서 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국토교통부 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구 사업의 지원(21UUTI-B157786-02)에 의해 수행되었습니다.

www.kci.go.kr

REFERENCES

- Baek, Y., Kim, G.W., Koo, H.B., 2000, Slope stability associated with construction, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-17.
- Beak, J.H., Beak, S.H., Han, D.H., Won, A.R., Kim, C.H., 2012, A Study on the Design of PLHBM, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 66-76.
- Choi, H.B., Han, D.H., Ki, K.C., 2016, A Study on the Decay Effect of Ground Vibration based on the Number of PLHBM Holes in Gneiss Area, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 1-9.
- Jung, J.H., 2021, A Study on the Development of a Monitoring System of Drilling and Image Data from PLHBM to Assess the Ground Condition Beyond Tunnel Face, Master's Thesis, Hanyang University, pp. 1-46.
- Kim, K.S., Kim, J.H., Jeong, L.C., Lee, I.M., Cho, G.C., 2015, Development for Prediction System of TBM Tunnel Face ahead using Probe Drilling Equipment and Drilled Hole Imaging Equipment, *Journal of Korean Tunnelling Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 393-401.
- Kim, K.Y., Kim, C.Y., Yim, S.B., Yun, H.S., Seo, Y.S., 2006, A Study on Problems and Improvements of Face Mapping during Tunnel Construction, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 3, pp. 265-273.
- Kim, M.S., Lee, J.K., Choi, Y.H., Kim, S.H., Jeong, K.W., Kim, K.L., Lee, S.W., 2020, A Study on the Optimal Setting of Large Uncharged Hole Boring Machine for Reducing Blast-induced Vibration using Deep Learning, *Journal of Korean Society of Explosives and Blasting Engineering*, Vol 38, No. 4, pp. 16-25.
- Kim, Y.I., Cho, S.K., Yang, J.H., Kim, C.S., Lee, N.Y., 2003, Application of Rockmass Prediction System during Tunnel Excavation, *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Conference*, Seoul, Korea, 29-30 September, pp. 13-29.
- Kim, Y.K., Lee, S.S., 2020, Application of Artificial Neural Networks in Assessing Mining subsidence Risk, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 4, pp. 1-20.
- Lee, G.J., 2008, A Study on Technical Methods to Reduce Noise and Vibration due to Tunnel Blasting in Urban Areas, Master's Thesis, Hanyang University, pp. 1-57.
- Lee, J.M., Kwak, H.J., Kim, Y.G., Baek, K.H., Cho, C.H., 2001, Prediction and Evaluation of Rock Mass Condition by Seismic Profiling Method in Tunnel, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 3, No. 3, pp. 45-56.
- Park, J.G., Jang, S.H., Shin, H.G., Yoo, C.S., 2013, Analysis of the Collapse of the Case for the Type Formalized Tunnel Collapse, *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Samcheok, Korea, 10-12 October, pp. 313-316.
- Shin, H.S., Lee, S.H., Bae, G.J., 2007, Survey of Tunnel Collapses, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 10, pp. 2979-2982.
- You, J.O., Baek, S.K., 2004, Application of TSP Survey during Tunnel Excavation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 10, pp. 3660-3664.