

숫자와 그림으로 보는 터널 이야기

- 제10강 NATM 터널 리스크와 안전관리 -

Risk and Safety Management in NATM Tunnel

김영근 | ㈜건화 부사장, 한국터널지하공간학회 감사, 공학박사, 기술사



지질 및 암반과 같은 자연재료를 굴착하는 NATM 터널 공사는 지반 자체의 불확실성으로 인해, 지반조사 및 설계를 철저히 수행하더라도 시공 중 다양한 사고가 발생할 가능성이 있다. 지금까지 발생한 여러 NATM 터널 사고의 교훈을 바탕으로, 설계 및 시공의 기술적 문제, 공사체계(설계·시공·감리)의 문제, 그리고 이를 운영·관리하는 시스템의 문제 등이 지속적으로 개선·발전되어 왔다.

이러한 NATM 터널 사고로부터 얻은 교훈을 바탕으로, NATM 터널 사고를 최소화하고 합리적인 공사를 수행할 수 있는 방법을 정리하였다. <표 1>에는 NATM 터널에서의 10가지 리스크와 6가지 안전관리 포인트가 정리되어 있다.

본 고에서는 NATM 터널의 주요 리스크를 분석하고, NATM 터널의 안전관리 및 사고를 줄이는 방안에 대해 기술하였다.

<표 1> NATM 리스크 및 안전 관리 방법

Key Risk		Cause	Effect	
R I S K	지질 리스크	단층 파쇄대	Very Weak Zone	붕락/붕괴
		연약대/풍화대	Weathered Soil/Rock	붕락/붕괴
		저토피	갱구부/계곡부	붕락/붕괴
		출수/용수	지하수 유입	과다출수/붕락
		절리 거동	Against Dip/블록	낙반/막장 슬라이딩
		복합 암반	Soft + Hard Rock	낙반/막장 슬라이딩
	장기 열화/변질	우수 및 지하수 영향	과다변형/소성변형	
시공 리스크	지보 문제	지보역할 부족	붕락/과다변형	
	보강 문제	보강성능 부족	붕락/과다변형	
	인버트 문제	폐합구조 불형성	붕락/과다변형	
Key Points		How to Control		
S A F E T Y	지질/암질 변화		지질/암질 변화에 능동적으로 대응하자	
	정량적인 페이스 매핑		NATM의 기본인 페이스 매핑에 집중하자	
	지속적인 계측관리		계측 데이터로부터 안정성을 판단하자	
	현장전문가의 의사결정		현장에서의 터널전문가 결정이 우선이다	
	단층파쇄대 우선 보강		단층파쇄대+용수가 가장 위험하다	
	지질/시공 리스크 관리		시공 중 지질/시공 리스크 관리의 필수이다	

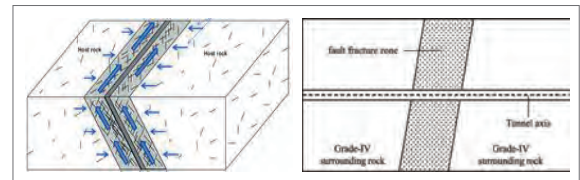
1. NATM 터널의 주요 리스크

1.1 지질 리스크-단층파쇄대(Fault Fracture Zone)

지질 리스크(Geo-Risk)는 터널 공사와 같은 지반 관련 프로젝트에서 예상치 못한 지질학적 조건으로 인해 발생할 수 있는 위험을 의미한다. 즉, 땅속에 존재하는 다양한 지질학적 요인이 터널 공사 과정에서 예기치 못한 문제를 초래하여 공사 기간 지연, 비용 증가, 안전사고 발생 등의 가능성을 높일 수 있다.

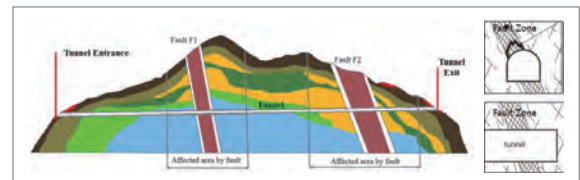
특히, 단층을 중심으로 암석이 심하게 부서지고 파쇄된 지역을 단층파쇄대라고 한다. 단층 운동 과정에서 발생하는 마찰과 압력으로 인해 암석이 미세한 조각으로 부서지며, 이러한 조각들이 밀집되어 단층파쇄대를 형성하게 된다.

[그림 1] 단층 파쇄대(Fracture Zone)



단층파쇄대는 강도가 약해 터널 천장이나 측면의 붕괴 위험이 높으며, 투수성이 높아 지하수 유입량이 많아져 공사를 지연시키고, 안전사고의 위험을 높인다. 또한 단층파쇄대는 불안정하여 터널 굴착 시 예상치 못한 움직임을 보일 수 있으며, 단층파쇄대는 지진 활동이 활발한 지역이므로 터널 안전성을 위협할 수 있다. NATM 터널에서 단층파쇄대는 가장 위험한 리스크이다.

[그림 2] 단층 파쇄대에서의 터널링 리스크

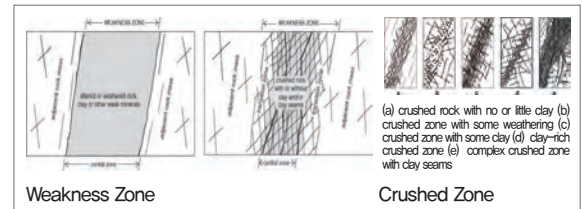


1.2 지질 리스크-연약대(Weakness Zone)

연약대(Weakness Zone)는 지반의 강도가 매우 약하여 터널 공사 시 붕괴나 침하 등의 문제를 일으킬 가능성이 높은 지층을

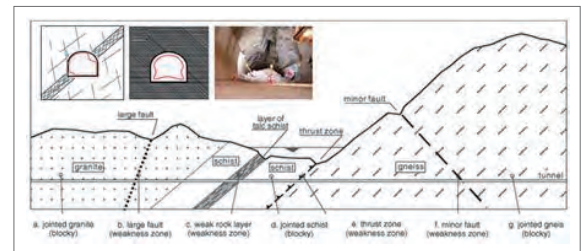
말한다. 주로 점토, 실트, 모래 등의 미립자로 구성되어 있으며, 물을 많이 함유하고 있어 강도가 더욱 약해진다. 파쇄존(Crushed zone)은 지각 변동이나 외부적인 힘에 의해 암석이 심하게 부서지고 잘게 쪼개진 지역을 말한다. 마치 큰 암석을 망치로 세게 내려쳐 부순 것처럼, 파쇄대 내의 암석들은 작은 조각들로 산산조각이 나 있는 상태이다.

[그림 3] 연약대(Weakness Zone)



연약대가 터널 공사에 미치는 영향은 크게 연약한 암반이 주변 암반에 비해 상대적으로 강도가 약해 터널 붕괴 위험성이 높다는 점이다. 또한 연약화 작용으로 인해 암반 내 절리(불연속면)가 많아져 지하수 유입이 증가할 수 있기 때문에 터널 굴착 후 용수가 발생하기 쉬우며, 이는 터널 불안정성의 주요 원인이 되고 있다. 특히 연약대는 단층파쇄대와 달리 주변 암반과의 상대적 차이가 크지 않은 경우가 많으므로, 굴착 중 이를 확인하고 평가하는 데 주의해야 한다.

[그림 4] 연약대에서의 터널링 리스크

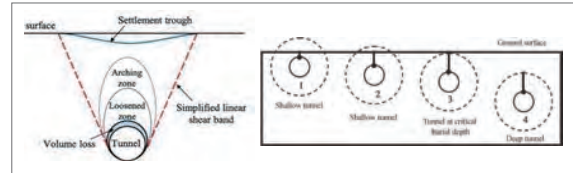


1.3 지질 리스크-저토피(Shallow Overburden)

NATM 터널 공사에서 저토피는 토피가 상대적으로 얇은 구간으로, 아칭 효과를 발휘하기 어렵기 때문에 굴착 중 안전성에 대한 리스크가 크다고 할 수 있다. 일반적으로 아칭 효과로 인한 터널 안정성을 확보하기 위해서는 2D(D: 터널 직경) 이상의

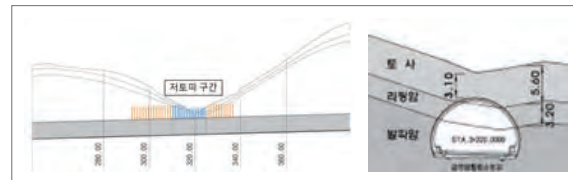
토피를 확보하는 것이 바람직하다. 하지만 터널 선형 계획 시 1D 이하의 저토피 구간이 발생할 수 있으며, 이러한 구간에서는 별도의 굴착 및 보강 대책을 수립해야 한다.

[그림 5] 터널 토피고와 아칭 효과



저토피 구간의 주요 리스크로는 토피고(overburden)가 얇아 지 지력이 약하기 때문에 굴착 시 붕괴 발생 가능성이 높으며, 특히 지하수 유입 시 붕괴 위험이 커 지게 된다. 또한 굴착으로 인해 지반이 불안정해져 지표 침하가 발생할 수 있으며, 주변 건물에 손상을 입힐 수 있다. 저토피 구간은 지하수가 풍부한 경우가 많아 굴착 시 대량의 지하수 유입이 발생할 수 있으며, 이는 굴착 작업을 방해하고 안전사고를 유발하여 주변 환경에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 저토피 구간을 통과할 때는 굴착 전에 지상에서 사전 보강을 실시하는 것이 좋으며, 지상 보강이 어려운 경우에는 저토피 전후 구간에 보강을 실시하도록 한다.

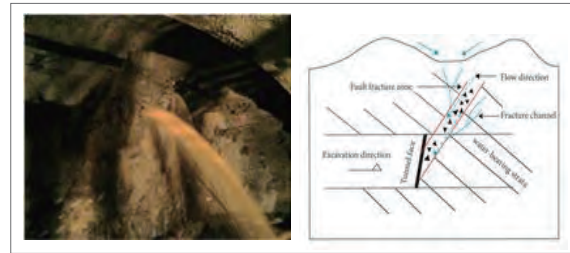
[그림 6] 저토피 구간에서의 터널보강



1.4 지질 리스크-출수/용수(Water inrush and inflow)

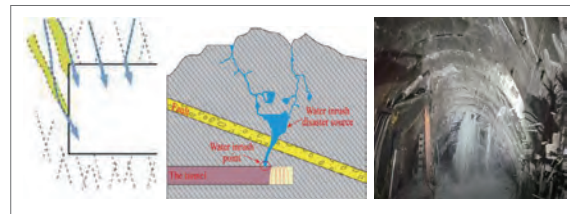
터널은 매우 복잡한 지질 조건에서 터널 내 출수나 용수가 발생할 수 있다. 단층파쇄대는 터널이 자주 통과하는 부적합한 지질 구조로, 지하수 함량이 풍부하고 구조가 느슨하며 결합력이 약한 것이 특징이다. 이러한 특성은 터널 굴착 중 지하수 유입으로 쉽게 이어지며, 대량의 출수나 용수가 발생하여 터널의 안전성을 심각하게 위협할 수 있다. 또한 단층파쇄대나 연약대는 집중 우수(雨水)의 영향을 받아 용수로 이어지며, 이는 대형 붕괴 사고를 유발할 수 있으므로 특히 유의해야 한다.

[그림 7] NATM 터널에서의 출수



터널 굴착 시 예상치 못한 지하수 유입은 공기 지연, 안전사고 발생, 공사비 증가 등 다양한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 사전에 철저한 지질 조사와 함께 효과적인 배수 대책을 수립하는 것이 중요하다. 출수 및 용수 발생 원인으로는 굴착 깊이가 깊어질수록 지하수위가 높아져 유입량이 증가할 수 있다. 또한 단층파쇄대와 같은 지하수가 이동하기 쉬운 지질 구조는 출수량을 증가시키는 주요 원인이다. 강우 시 지하수위가 상승하여 유입량이 급격히 증가할 수 있다.

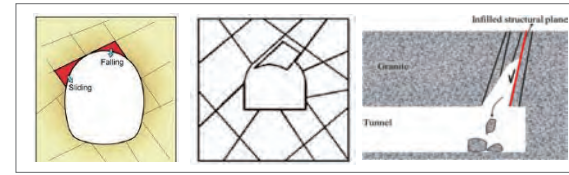
[그림 8] NATM 터널에서의 출수 및 용수 리스크



1.5 지질 리스크-절리 거동

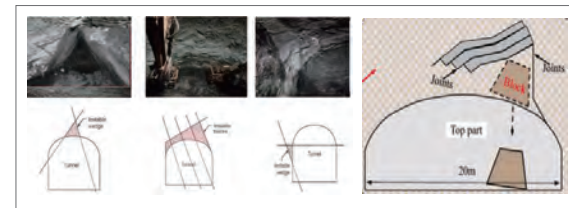
암반 불연속면은 암반 내에서 서로 분리된 면을 의미하며, 암석의 강도와 안정성을 저하하는 주요 원인이 되며, 다양한 지질적 요인에 의해 형성된다. 이와 같이 암반 불연속면에 의해 형성된 암반에는 블록성 암반(blocky rock mass)과 층상 암반(stratified rock mass)이 있다. 이러한 암반에서는 불연속면(절리/층리)이 주요 거동 인자로 작용하며, 터널을 굴착하게 되면 자유면이 형성되면서 낙반(falling)과 슬라이딩(sliding)이 발생할 수 있다. 따라서 터널 설계 및 시공 시 암반 불연속면의 특성을 정확하게 파악하고 이에 대한 적절한 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다.

[그림 9] 터널 주변 암반의 불연속면 거동



암반 불연속면의 거동은 터널의 안정성에 직접적인 영향을 미치며, 다양한 리스크를 유발할 수 있다. 불연속면이 교차하여 켜기형 블록이 형성될 경우, 굴착으로 인해 지지력이 상실되면 낙반이 발생할 가능성이 높다. 또한 층상 절리 등이 발달한 경우, 판상 형태의 암반이 탈락하여 붕괴를 일으킬 수 있다. 불연속면을 따라 전단 변형이 발생하면, 암반이 미끄러지면서 붕괴로 이어질 수 있다. 특히 터널 천단에서의 블록 낙반은 예측이 매우 어려우므로 유의해야 한다.

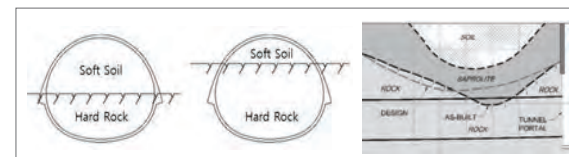
[그림 10] 터널 주변 암반의 불연속면 거동에 의한 리스크



1.6 지질 리스크-복합 암반

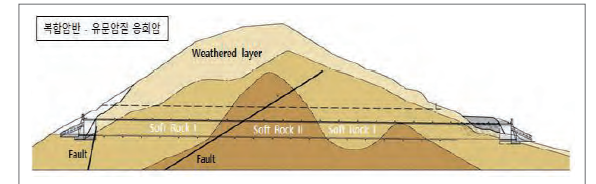
터널은 종단 방향의 긴 선형 구조물로서, 터널 굴착 중 다양한 지질 및 암반 조건을 조우하게 된다. 특히 하나의 막장면에서 토사(soft soil)와 암반(hard rock), 연암반(soft rock)과 경암반(hard rock)이 동시에 나타나는 경우가 많다. 이와 같은 암반에서는 상대적 강도 차이로 인해 부분적인 붕락 등의 문제가 발생할 수 있으므로, 암반 평가를 실시하여 굴착 및 지보 등에 적절한 대책을 수립해야 한다. 특히 연약한 부분에 대한 보강을 우선적으로 실시해야 한다.

[그림 11] 복합 암반-토사와 암반/연암반과 경암반



복합 암반은 하나의 지질 단위에서 연암반과 경암반이 교호하거나 혼재되어 나타나는 복합 구조(composite structure)를 가지는 암반을 말한다. 일반적으로 화산암 지대에서 연암반의 특성을 나타내는 미고결 또는 반고결 상태의 화산쇄설물 퇴적층과 현무암 또는 안산암 등의 경암반이 혼재되어 나타나거나, 서로 다른 공학적 특성을 가진 화산쇄설암이 순차적으로 퇴적되면서 연암반과 경암반이 교호하여 나타나는 응회암 지대에서 볼 수 있다. 복합 암반은 지층 자체의 불균질성뿐만 아니라, 단단한 암반 하부에 연약한 층이 존재하는 수직적 불균질성이 나타날 수 있는 지질 조건을 가지고 있으므로, 지반 조사 시 지층 조건이나 지반 조건에 대한 잘못된 해석을 초래할 수 있다. 특히 이러한 복합 특성은 하부 연약 암반에 의해 암반 구조물의 불안정성을 초래하여 큰 피해를 유발할 수 있다.

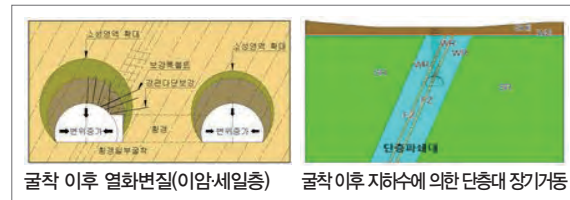
[그림 12] 지질성인에 의한 터널 종방향으로의 복합 암반



1.7 지질 리스크-장기 열화/변질

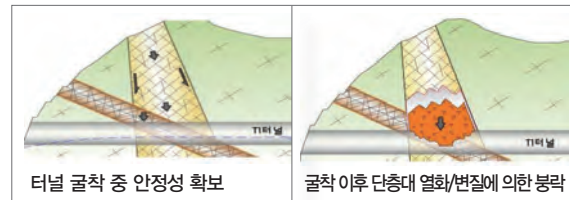
암반은 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 장기적으로 변질되고 열화될 수 있다. 이러한 변질과 열화는 터널의 안전성에 심각한 영향을 미치므로, 이에 대한 이해가 매우 중요하다. 암반의 장기 열화 및 변질의 원인으로는, 암석이 공기, 물, 생물 등과 접촉하여 화학적, 물리적, 생물학적으로 분해되는 풍화작용이 있다. 특히 지하수는 암석 내 광물 성분을 용해시키거나 침전시켜 암석의 강도를 저하시킬 수 있다. 터널 굴착 이후 열화변질이 급격히 증가하여, 소성 영역이 점차적으로 확대되면서 붕락에 이르는 경우가 발생할 수 있으며, 이는 이암이나 세일층에서 나타난다. 또한 단층파쇄대의 경우, 굴착 중에는 안정성이 확보되었다가 지하수 유동에 따른 장기적인 거동이 발생하여 문제가 되는 경우도 있다.

[그림 13] 이암세일층에서의 굴착 후 열화변질



암반의 장기 열화 및 변질은 암석의 강도가 저하되어 붕괴, 낙석 등의 위험이 증가하며, 지하수 유입이 용이해지고 침투성이 증가하게 되며, 암석의 내구성이 저하되어 구조물의 수명이 단축될 수 있다. [그림 14]는 단층파쇄대에 집중호우로 인한 우수가 침투하여, 장기적인 열화변질로 인해 터널 붕괴가 발생한 사례이다.

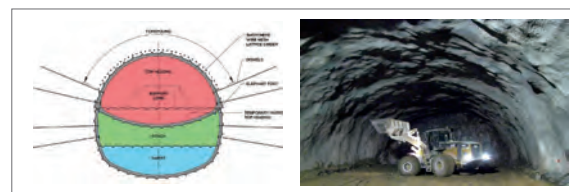
[그림 14] 단층대의 장기적인 열화변질에 의한 터널 붕괴 사례



1.8 시공 리스크-지보 문제

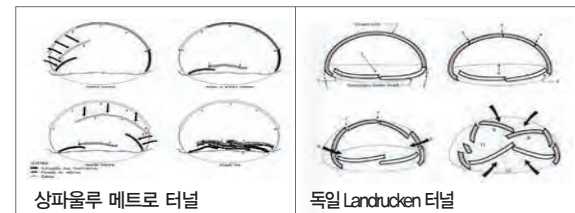
NATM 터널은 굴착으로 인해 발생하는 암반의 변형과 붕괴를 방지하고, 터널의 안정성을 확보하기 위해 지보를 설치하게 된다. 주 지보재인 슛크리트, 록볼트, 그리고 강지보재를 조합하여 암반의 상태에 따라 지보량을 결정하여 설치한다. 따라서 적절한 지보량의 산정과 지보의 설치는 터널 안정성 확보에 가장 중요한 요소가 된다. 특히 슛크리트의 즉각적인 타설은 NATM 터널에서 가장 중요한 요소로, 제때 타설하지 못할 경우 터널 안정성에 문제가 발생할 수 있다.

[그림 15] NATM 터널에서의 지보 설치와 슛크리트 타설



[그림 16]은 NATM 터널 사고를 나타낸 것으로, 바닥부 가인버트에서 과지압에 의한 전단 파괴와 균열이 발생하고, 이어 측벽부에서 내측으로의 수평 변위가 발생하며 천단부에 균열이 확대되었다. 이후 좌우 측벽부와 인버트가 붕괴되고, 천단부가 완전히 파괴되어 터널 전체가 붕괴됨을 볼 수 있다. 이는 과지압(over stressing)으로 인해 설치된 지보력이 이를 견디지 못하면서 발생한 사고이다.

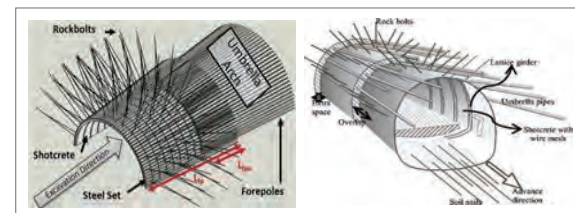
[그림 16] 지보력 부족에 의한 슛크리트 라이닝 파괴



1.9 시공 리스크-보강 문제

NATM 터널에서 주 지보재로 지보력을 확보하지 못한 경우, 다양한 보조 보강 공법을 적용하여 연약대나 단층대에서도 시공이 가능하게 된다. 가장 일반적으로 적용되는 보강 공법은 강관 보강 그라우팅으로, 본 공법은 터널 굴착 시 암반의 불안정한 구간이나 지하수 유입이 예상되는 구간에 강관을 설치하고, 그 주변에 그라우트 재료를 주입하여 암반과 강관을 일체화시키는 방식이다. 이를 통해 암반의 강도를 증가시키고, 균열을 메워 지하수 유출을 방지하며, 터널의 안정성을 확보하는 효과를 얻을 수 있다.

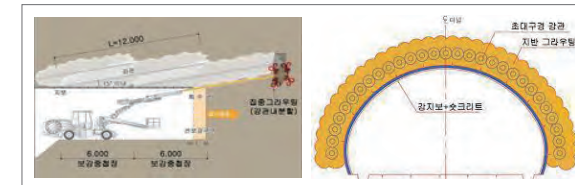
[그림 17] NATM 터널 보조보강공법-강관보강그라우팅



대부분의 경우 암반이 불량한 경우 강관 보강 그라우팅을 적용하기 때문에, 강관 보강 그라우팅의 보강 효과 발현은 매우 중요하다. 특히 지반/암반 상태에 따라 강관의 크기, 강관의 간격,

강관의 배열 등을 계획하게 되는데, 강관 보강 그라우팅이 제대로 보강 효과를 발휘하지 못하면 터널 붕락 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 시공 과정을 철저히 관리하고, 품질 검사를 주기적으로 실시하여 문제 발생 시 신속하게 대처해야 한다.

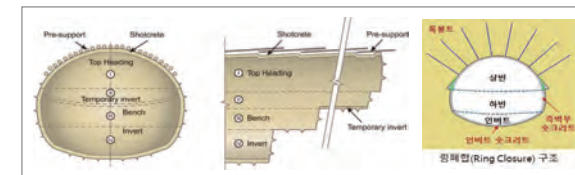
[그림 18] 강관보강그라우팅의 설계와 시공



1.10 시공 리스크-인버트 문제

터널 인버트(invert)는 터널의 바닥 부분을 의미하며, 인버트를 타설함으로써 완전한 링 폐합 구조(ring closure)를 형성하게 되어 상부에서 작용하는 하중을 넓은 면적으로 분산시켜 지반에 미치는 응력을 감소시키고, 터널의 구조적 안정성을 확보할 수 있다. 특히 암반이 불량한 구간에서는 시공 중 1차 라이닝으로 인버트 슛크리트를 타설하고, 2차 라이닝으로 인버트 콘크리트를 타설하게 된다. 하지만 인버트는 구조적 안정성 확보라는 장점에도 불구하고, 시공성과 공사비 증가 등의 문제가 발생할 수 있으므로 암반 상태를 충분히 고려하여 적용해야 한다.

[그림 19] NATM 터널에서의 인버트



[그림 20]은 인버트 미설치로 인한 터널 변형 사례를 나타낸 것이다. 시공 중 막장 조사 결과 인버트가 필요하지 않은 것으로 판단되었으나, 터널 주변 단층파쇄대의 장기적인 거동으로 인해 터널 바닥부에서 히빙이 발생하였다. 따라서 인버트는 터널의 안전성과 기능을 유지하는 데 매우 중요한 역할을 하므로, 터널 설계 및 시공 시 인버트에 대한 충분한 고려가 필요하다.

[그림 20] 인버트 미설치에 의한 터널 변형 리스크

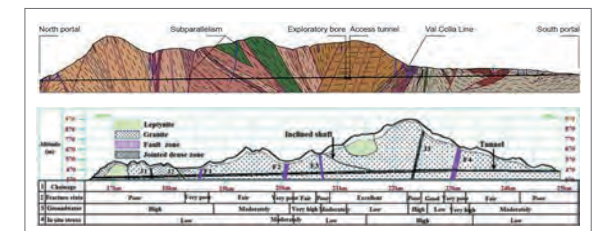


2. NATM 터널에서 사고 줄이는 방법

2.1 급격한 지질 변화는 지속적으로 확인하자

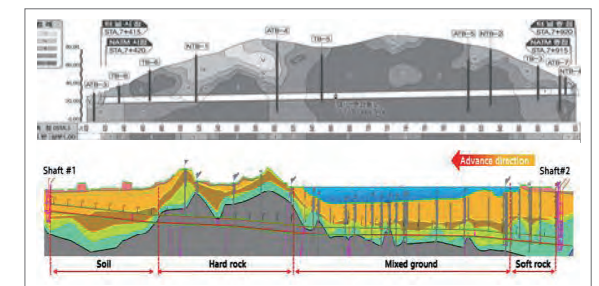
NATM 터널공법의 원리는 굴착 중 확인되는 지반 및 지질조건에 적합한 가축성 지보를 신속하게 시공하는 것이다. 터널 공사에서는 종방향으로 굴착하는 과정에서 다양한 지질 조건을 만나게 되는데, 특히 예상하지 못한 급격한 지질변화가 나타나는 경우가 많다.

[그림 21] NATM 터널에서의 종방향 지질 변화



또한 터널 굴착 과정에서 암종 및 지질 특성뿐만 아니라 암질 및 암반 특성도 달라지는 경우가 대부분이다. 따라서 조사설계 과정에서 파악한 지질 및 암질의 변화는 하나의 참고사항이므로, 시공 중 이를 매 막장마다 확인하고 평가하며 예측하는 과정, 즉 페이스 매핑(face mapping)이 중요하다 할 수 있다.

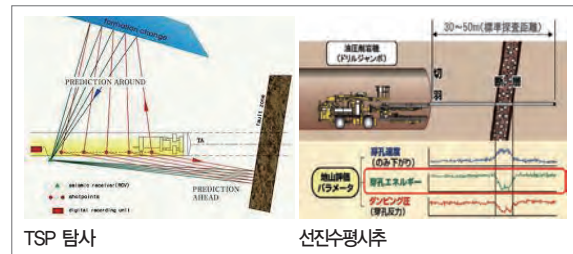
[그림 22] NATM 터널에서의 종방향 암질 변화



● 급격한 지질 변화에 대응하는 방법

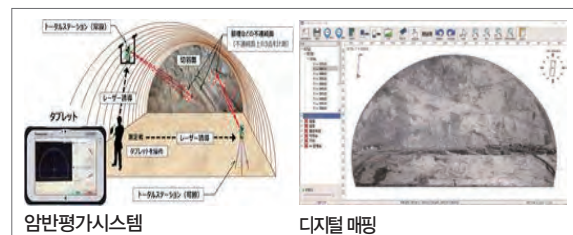
터널 설계 단계에서의 지반 조사 결과는 가장 중요한 기본 자료이자, 터널 전 구간에 대한 지질 리스크 및 암반 특성을 확인할 수 있는 데이터이다. 하지만 시공 중 이를 확인하는 절차인 페이스 매핑(face mapping)은 필수적이다. 또한 막장 전방의 지질을 예측하거나 지반 조사 결과에서 예측된 단층대를 확인하기 위해 TSP 탐사나 선진 수평 시추를 수행하게 된다. 특히 선진 수평 시추는 막장 전방의 지질 상태를 직접 확인할 수 있기 때문에 반드시 수행해야 하는 작업이다.

[그림 23] 터널막장 전방지질 예측



또한 매 막장마다 시행하는 페이스 매핑 결과는 눈으로 확인할 수 있는 가장 확실한 결과이다. 따라서 페이스 매핑에서 확인되는 급격한 지질 변화의 특성을 분석하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 지질을 아는 전문가의 판단과 페이스 매핑 결과를 정량적으로 분석하는 노력이 요구된다. 이는 터널 막장 평가 시 주관적 판단에 의지하지 않고, 객관적인 자료화를 통해 지질 특성뿐만 아니라 암반 평가 및 계층 결과와 연계하는 체계적인 프로세스가 필요함을 의미한다.

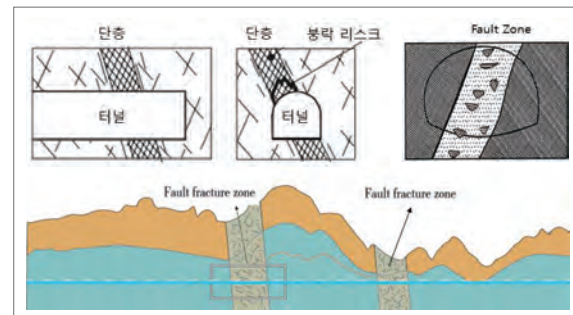
[그림 24] 터널 막장 평가 프로세스



2.2 단층파쇄대(연약대)는 가장 우선적으로 보강하자

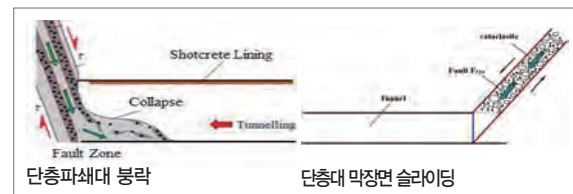
터널 공사에서 단층파쇄대(fault fracture zone)는 가장 취약하고 가장 위험한 지질 리스크이다. 단층파쇄대는 완전히 파쇄되어 부스러진 구간으로 일정한 폭의 존(zone)을 형성하는 경우, 터널 막장면과 터널 종방향 모두 붕락 리스크가 나타나게 된다. 또한 단층파쇄대는 사전 지반 조사에서 확인되는 경우 충분히 대응할 수 있지만, 시공 중 사전에 확인하지 못한 단층파쇄대가 나타나는 경우에는 특히 위험하므로 주의해야 한다.

[그림 25] 터널공사에서의 단층파쇄대와 리스크



특히 단층파쇄대가 가장 위험한 경우는 터널 막장면 쪽으로 경사(against dip)가 있는 경우로, 이때 막장면으로의 붕락 위험성이 가장 크다. 또한 단층파쇄대에 지하수가 유입되는 경우, 단층 점토(가우지)가 지하수에 의해 열화되고 변질될 수 있으므로 특히 유의해야 한다. 따라서 터널 공사 시 단층파쇄대의 폭, 위치 및 방향, 그리고 단층 가우지의 유무를 반드시 확인해야 한다.

[그림 26] 터널 막장면에서의 단층파쇄대

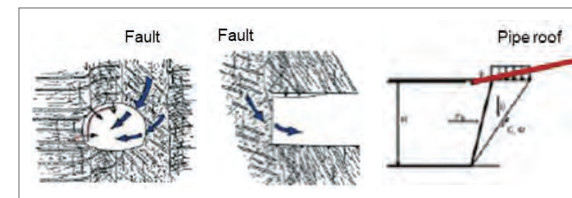


● 단층 파쇄대 보강하는 방법

단층파쇄대를 보강하는 데 있어 가장 중요한 것은 막장의 안정성을 조기에 확보하고, 지보를 설치하여 장기적인 터

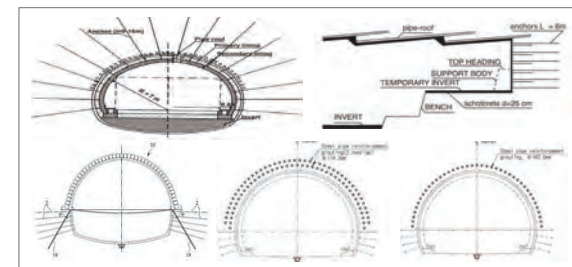
널의 안정성을 확보하는 것이다. 터널 단면 방향 및 종방향으로의 붕락 리스크를 제어하는 방법은 막장 전방에 파이프 루프(pipe roof)를 설치하는 것이다. 일반적으로 터널 천단부에 강관을 일정한 간격으로 설치하고, 강관 파이프 주변에 그라우팅을 실시하여 강관과 그라우트체를 일체화시켜 지보 성능을 최대한 확보하는 것이다.

[그림 27] 단층파쇄대 보강 개념



단층파쇄대 보강 시 적용되는 강관 보강 그라우팅 보강 공법은 터널의 안정성을 확보하기 위한 효과적인 방법이다. 하지만 지반 조건, 터널 규모, 공사 환경 등에 따라 적용 방안이 달라질 수 있으므로, 터널 전문가와의 충분한 협의를 통해 최적의 보강 방안을 수립해야 한다.

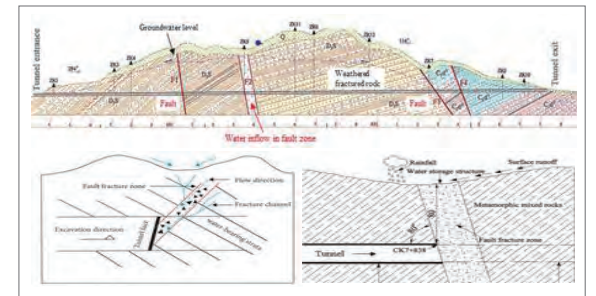
[그림 28] 단층파쇄대 보강 방안



2.3 연약대의 용수는 주의 깊게 관리하자

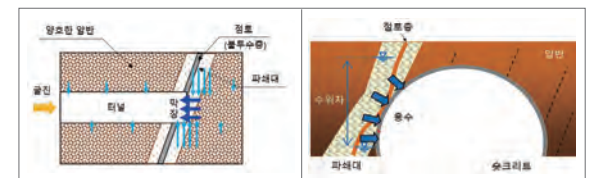
터널 공사에서의 용수 및 출수는 가장 위험한 리스크 중 하나이다. 특히 단층파쇄대와 같은 연약대의 경우, 터널 굴착에 따른 지하수 변동으로 인해 지하수가 연약한 구간으로 집중되면서, 굴착 이후 일정 시간이 경과하면 용수가 발생하는 경우가 많다. 집중호우 등으로 인해 우수가 연약대를 통해 유입되면서 터널 내 용수가 발생할 수 있으며, 이때 연약대의 열화변질을 초래할 수 있으므로 유의해야 한다.

[그림 29] 연약대에서의 용수와 영향



양호한 암반 사이에 놓인 연약대(파쇄대)는 지하수의 유로가 형성되기 쉽다. 종방향뿐만 아니라 터널 단면에서의 연약대(파쇄대)는 막장면으로의 용수를 유발하는 주요 원인이 되므로, 특히 연약대(파쇄대) 구간에서의 용수 위치, 용수량 및 용수 변화량 등을 확인해야 한다.

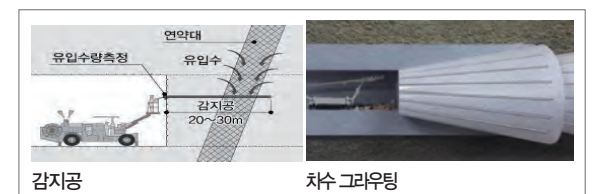
[그림 30] 단층파쇄에서의 용수



● 용수를 제어하는 방법

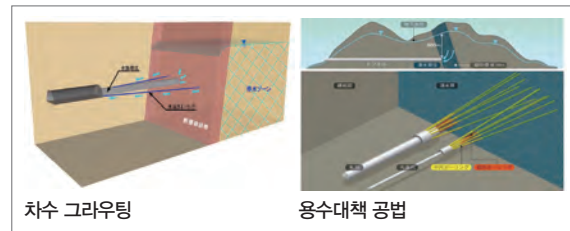
NATM 터널은 기본적으로 배수 개념의 터널이므로, 공사 중과 운영 중에 배수를 허용하게 된다. 따라서 일반적인 구간에서는 수발공을 설치하고 배수로로 구축하여 용수를 처리하게 된다. 하지만 터널 내 용수가 터널 안정성에 영향을 주거나, 해저 통과 구간과 같은 특별한 경우에는 용수를 제어하고 관리해야 한다. 특히 전방에 연약대가 있는 경우에는 사전에 감지공을 천공하여 유입 수량을 확인하고, 이에 따라 적절한 차수 그라우팅 계획을 수립해야 한다.

[그림 31] 터널전방 감지공 및 차수그라우팅



터널 그라우팅에는 터널 굴착 전에 미리 그라우팅을 실시하여 지하수 유입을 차단하는 선행 그라우팅과, 터널 굴착 후 굴착면 주변에 그라우팅을 실시하는 후행 그라우팅으로 구분되며, 굴착면에 부채꼴 모양으로 구멍을 뚫고 그라우팅 재료를 주입하는 팬 그라우팅이 적용된다. 특히 연약대(파쇄대) 구간에 대한 차수 그라우팅은 터널 안정성 확보에 있어 중요하다.

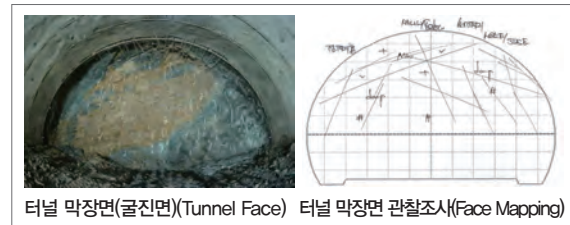
[그림 32] 터널 차수그라우팅 및 용수대책



2.4 페이스 매핑은 가장 기본적이고 중요한 프로세스이다

터널 페이스 매핑(face mapping)은 터널 굴착면의 지질 상태, 암반 특성, 불연속면, 지하수 유출 등을 육안으로 관찰하고 기록하는 작업을 의미한다. 즉, 터널 굴착이 진행됨에 따라 지속적으로 변화하는 굴착면의 상태를 정확하게 파악하여, 터널 시공에 필요한 정보를 제공하는 중요한 과정이다. 특히 시공 전 터널 구간에 대한 정보를 완벽하게 획득하는 것은 어렵기 때문에, 매 막장마다 관찰 및 확인을 통해 지질 및 암질 상태를 평가해야 한다.

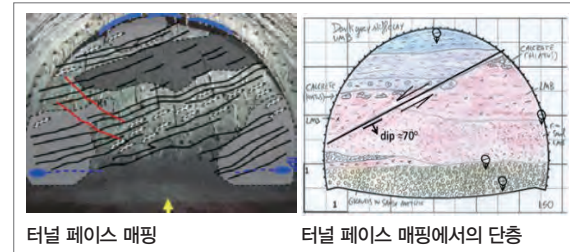
[그림 33] NATM 터널에서의 페이스 매핑



터널 굴착은 예측할 수 없는 지질 조건 변화에 항상 노출되어 있다. 페이스 매핑은 이러한 변화에 신속하게 대응하고, 안전하고 효율적인 터널 시공을 위해 필수적인 과정이다. 특히 NATM 터널에서의 페이스 매핑은 암질 변화에 따라 적합

한 지보를 설치한다는 원칙을 기반으로 하는 가장 기본적인 고 중요한 프로세스이다. 대부분의 경우 발주처 자체의 암 판정 절차로 기준화 및 절차화되어 있고, 모든 데이터를 공학적으로 평가하도록 해야 한다.

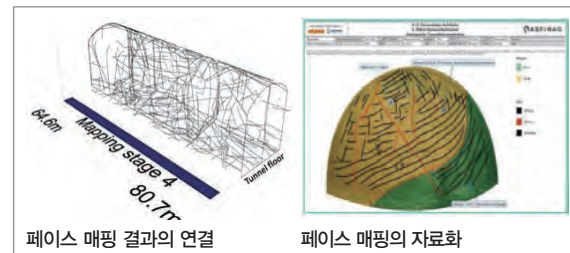
[그림 34] NATM 터널에서의 막장 관찰



◎ 페이스 매핑 잘하는 방법

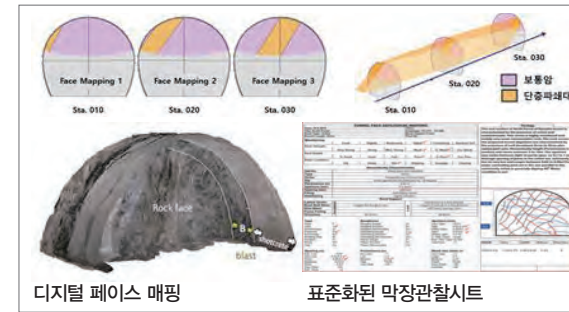
페이스 매핑에서 가장 중요한 것은 매 막장의 면을 관찰하고 이를 연결하여 터널 굴착 방향으로 3차원적으로 확인하는 것이다. 이를 위해서는 지질 및 지반에 대한 전문적인 지식뿐만 아니라 상당한 경험이 요구되므로, 현장에 터널 전문가가 상주하면서 페이스 매핑 자료를 체계적으로 정리해야 한다. 또한 이를 통해 터널 주변 주간(週間)의 지질 변화를 예측하고, 지질 리스크를 확인해야 한다.

[그림 35] 페이스 매핑 결과의 정량화



현재 비정량화된 터널 페이스 매핑을 보다 객관화하고 정량화하기 위해, 디지털 매핑, 온라인 자동화 기술 및 스마트 기기를 활용한 다양한 기술이 개발되고 있으므로 이를 적극적으로 활용하는 것도 필요하다. 또한, 단순한 지질 및 암질 분석뿐만 아니라 터널 거동과 어떤 연관성을 갖는지 판단하는 것도 중요하다.

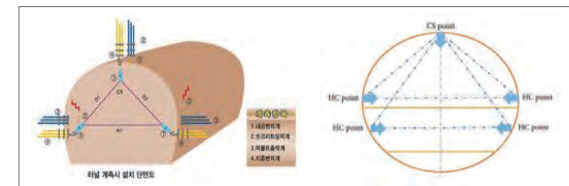
[그림 36] 디지털 페이스 매핑



2.5 계측 데이터에 변화에 주의를 기울이자

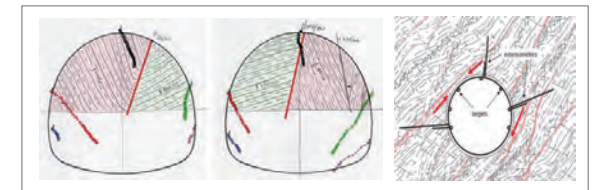
NATM 터널은 시공 후 지보의 적정성 및 터널의 안정성을 계측을 통해 판단하는 관찰적 방법(observational method)에 기초하고 있다. 따라서 터널 공사에서의 계측은 시공 중 발생할 수 있는 변위 및 침하 등의 위험을 사전에 감지하고, 안전성을 확보하기 위한 필수적인 작업이다. 특히 터널 내공 변위, 슛크리트 응력, 록볼트 축력 및 지중 변위 등의 계측 항목이 있지만, 이 중 가장 중요한 것은 터널 내공 변위로, 이를 통해 터널의 변형 거동을 판단할 수 있다.

[그림 37] NATM 터널 주요 계측항목



터널 내공 변위는 터널 굴착 시 주변 지반의 응력 재분배로 인해 터널 내벽면에서 발생하는 변형을 의미한다. 즉, 터널을 굴착하면 주변 암반이 변형되면서 터널 내벽면이 안쪽으로 이동하는 현상이 발생하게 되므로, 이는 터널 주변 암반 특성과 밀접한 관계가 있다. 터널 내공 변위를 정확하게 측정하고 분석하는 것은 터널의 안정성을 평가하고 붕괴 가능성을 예측하여 사고를 예방하는 데 필수적이며, 지보재의 종류, 지보재량, 설치시기를 결정하는 데 필요한 자료를 제공한다. 또한 시공 과정에서 발생하는 문제점을 조기에 발견하고 대처할 수 있으며, 터널의 장기적인 안전성을 확보하기 위한 유지관리 계획 수립에도 활용된다.

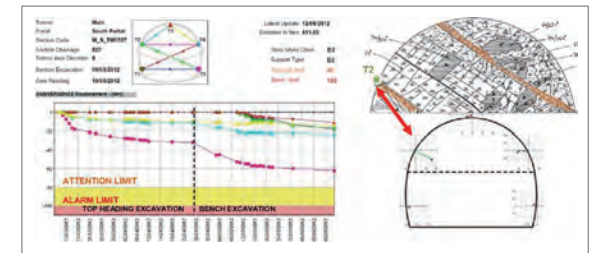
[그림 38] 터널 주변 암반특성과 변형 거동



◎ 계측 잘하는 방법

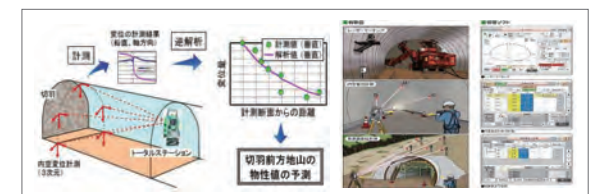
터널 계측 데이터는 터널 주변 지질 및 암반 특성과 연관성이 매우 크기 때문에, 반드시 페이스 매핑 결과와 함께 분석해야 한다. 또한, 내공 변위는 굴착 직후 급격하게 증가하다가 시간이 지남에 따라 변화율이 감소하는 경향을 보이며, 이러한 경시 변화가 발생하게 된다. 내공 변위의 수렴 여부는 터널의 안정성을 확인하는 가장 중요한 판단 자료이므로, 굴착 직후부터 변위의 변화를 지속적으로 확인해야 한다.

[그림 39] 계측 결과와 페이스 매핑 결과 비교 검증



최근 터널 계측에는 IoT 기반 무선 센서 기술, 레이저 스캐닝 기술, AI 기반 데이터 분석 기술, 광섬유 센서 기술 등 다양한 신기술이 개발되고 있다. 이러한 신기술은 온라인 자동화 디지털 모니터링이 가능한 방향으로 적용되고 있으며, 계측 데이터 및 페이스 매핑 등이 통합적인 시스템으로 운영되고 있다.

[그림 40] 계측관련 신기술



■ 제10강을 마치면서

- 사고로부터 배운다

The SMARTER, The SAFER



Why? 지난 수십 년 동안 우리 터널 분야는 많은 변화와 발전을 거듭해 왔다. 새로운 공법과 기술이 도입되고 적용되면서 설계와 시공 분야는 보다 안전하고 효율적인 시스템으로 운영되고 있다. 특히 안전 관리 규정과 기준이 강화되면서, 터널 현장에서는 안전에 대한 관리가 보다 철저하고 엄격하게 수행되고 있다. 그럼에도 불구하고 여전히

크고 작은 사고가 발생하는 것이 현실이다. 신문이나 TV 등에서 보도되는 터널 붕락 사고 및 싱크홀 사고 소식을 접하면, 여전히 터널 사고가 발생하는 근본적인 원인에 대해 고민하게 되며, 터널 전문가로서의 책임을 느끼게 된다. 왜 터널 사고(accident)는 발생하는 것일까?

Which? 지난 세월 동안 국내뿐만 아니라 세계 곳곳의 터널 현장에서 다양한 터널 사고가 발생해 왔다. 선진국이라 할 수 있는 영국, 독일, 일본, 캐나다 그리고 호주 등에서 대형 터널 붕락 사고, 도로 함몰 및 싱크홀 사고 등이 발생하고 있다. 터널 사고 발생 시 가장 중요한 것은 터널 붕락 사고에 대한 공학적 분석과 조사가 반드시 필요하다는 것이다. 해외의 주요 터널 사고의 경우, 국가 차원의 조사위원회가 구성되어 보다 객관적이고 공정한 사고 조사를 통해 사고 발생 원인을 분석하고, 적절한 대책을 수립하고자 하였다. 궁극적으로는 사고 재발 방지를 위한 안전 이슈에 대한 법적제도적 보완으로 이어지기도 했다. 이와 같이 세계적으로 이슈가 되었던 터널 사고 사례(case)에는 어떤 것들이 있었을까?

What? “사고로부터 배운다”라는 말이 있다. 이미 발생한 터널 사고는 공사비 및 공기 등 터널 공사에 막대한 영향을 미칠 뿐만 아니라, 인명 사고 및 주변의 심각한 재산상의 손실을 초래할 수 있다. 따라서 적절한 대책을 조속히 실현하는 것뿐만 아니라, 유사한 사고가 다시 발생하지 않도록 하는 것도 중요하다. 이를 위해 철저한 조사 결과를 바탕으로 터널 공사 시스템에 반영하는 노력이 요구되고 있다. 터널 사고로부터 배워야 할 교훈(lesson learned)은 무엇일까?

Zero? 지하터널의 시대가 오고 있다. 지하터널의 시대에 있어 터널사고가 최소화되고 가능한 발생하지 않도록 하는 노력이 무엇보다 필요하다. 공사비 및 공기라는 절대적 목표 아래 모든 프로세스와 규정을 준수하고 안전관리에 만전을 다하는 것은 쉽지 않은 일이지만, 그럼에도 불구하고 지하터널 공사에서의 사고 발생을 제로화(zero accident)하는 것은 터널기술자의 최종적인 목표라 할 수 있다.

끝으로 [터널 사고 줄이는 방법]을 요약하였다. NATM 터널에서 6가지, TBM 터널에서 6가지 등 총 12가지로 나타내었으며, 이를 다시 정리하여 [The SMARTER The SAFER]로 표현하였다. 터널 공사에서 사고를 줄이는 가장 현명한 방법은 터널 공사의 핵심 리스크(risk)를 스마트하고 안전하게 관리하는 것이다. 🇫🇷

〈표 2〉 터널 사고 줄이는 방법 The SMARTER·The SAFER

구분	핵심 사항	비고
S	굴진 및 막장압 관리가 핵심이다. Stability Control of Face Pressure	TBM
M	복합적이고 변화 많은 지질이 가장 문제다. Mixed and Complex Ground	TBM
A	TBM 장비 정지시 주변 거동을 체크하자. Alert Monitoring in Cutterhead Intervention	TBM
R	피난연락경 굴착이 가장 위험한 공정이다. Risk of Cross Passage Excavation	TBM
T	지반에 적합한 TBM 선정이 가장 중요하다. TBM Suitable Selection for the Ground	TBM
E	굴착토 관리는 정량적으로 하자. Excavated Ground and Material Management	TBM
R	지질 리스크를 확인하고 관리하자. Risk Control and Geo-Risk Management	NATM
S	암반에 적합한 빠른 지보설치가 가장 중요하다. Support Installation by Rock Mass Classification	NATM
A	페이스 매핑과 같은 기본 프로세스를 잘 하자. Accredited Geo-Face Mapping	NATM
F	단층파쇄대 굴착이 가장 위험한 공정이다. Fault Fracture and Weakness Zone	NATM
E	현장중심의 터널 전문가 판단이 필요하다. Expert Engineer in Tunnel On-Site	NATM
R	계측 등 NATM 원칙에 충실하자. Robust Measurement & Monitoring	NATM