

해저터널 시공 안전성 향상을 위한 선진시추기술 현황분석



김형목
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
선임연구원



박의섭
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
선임연구원



신희순
한국지질자원연구원
영년직연구원

1. 서론

불균질한 지질특성의 암반을 굴착하는 터널시공기술은 어두운 밤길을 운전하는 것에 비유될 수 있다. 칠흑같이 어두운 밤길을 전조등을 밝히고 도로사정을 미리 파악함으로써 안전하게 운전할 수 있는 것처럼 선진시추를 통해 막장면 전방의 지질조건을 사전에 파악하고 대응책을 강구함으로써 불확실성을 다수 내재한 암반에서의 터널시공 안전성을 향상 시킬 수 있다.

해저터널은 바다밑에 건설되는 특징으로 인해 조사에 많은 제약 및 어려움이 따르고 고수압이 작용하는 조건에서 시공하게 된다. 따라서, 육상터널에 비해 조사 자료의 부족으로 인한 불확실성 요인이 상대적으로 크고 조사과정에서 예측치 못한 함수파쇄대 등을 통한 돌발 용수에 의한 시공 중단 등의 위험성이 더욱 높다고 할 수 있다. 따라서, 해저터널 시공과정 중 막장면에서의 선진시추를

통한 사전 지질정보 획득은 육상터널에 비해 더욱 필수적으로 요구된다. 여기서 선진시추기술은 NATM공법에서의 물빼기 보조공법 및 막장 전방 지질조사 목적의 선진시추기술 뿐만 아니라 터널 시공전 혹은 시공과정에서 터널 외부에서의 방향제어를 통한 수평시추기술까지 포함된다.

본 고에서는 일본 ‘터널과 지하’에 2008년 9월부터 2009년 4월까지 8회에 걸쳐 연재된 기사를 중심으로 막장면 전방 지질조건에 대한 사전 조사를 목적으로 실시되어온 최근의 선진시추기술의 종류 및 특징, 시공사례 등을 소개함으로써 국내의 유사한 시공현장에서의 참고자료 제공 및 향후 관련 기술 개발을 위한 정보 공유를 목적으로 한다.

터널 시공 과정 중 막장면 전방 지질조건을 파악하기 위한 기술로는 선진시추기술 이외에도 TSP 탐사로 대표되는 물리탐사기술이 활용되고 있으며 이들 전방탐사기술들의 주요 적용범위 및 현황을 표 1에 정리하였다.

표 1. 전방탐사기술 현황 및 평가(시공중 갱내에서 실시하는 조사기술)

개요	조사수업	탐색면 관찰·화상처리	시추 조사장의 활용										물리탐사				
			시추 조사		조사경사각	공내 관찰·화상처리	각종공내시정 및 각종	각종물리량	각종원위치시형	천공검출법	지온측정	암반선형변위측정	경내비저항탐사	경내강이탄성파탐사	경내수평탄성파탐사	표면파탐사법	전자파탐사법
			코어 채취	코어 회수													
탐사내용	막장면암반상태	천공정보	코어 채취	각종암반정보	공내 암반정보	각종물리량	파괴에너지	암반온도	암반선형변위	비저항분포	탄성파속도	탄성파반사면등	표면파전파속도	전자파반사면등			
기본 조사	조사가능거리(m) ^{*1}	굴착면	시추 조사갱 심도					80	수m	20	수m	수m	100	30	10		
	준비·작업시간 ^{*2}	◎	△	△	△	△	△	△	◎	◎	◎	◎	○	△	○	◎	
	해석시간 ^{*3}	◎	◎	△	△	△	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	
조사항목 ^{*4}	지층 상태의 변화	파쇄대 위치	○	◎	◎				◎			○		○	○	○	
		파쇄대 주향·경사	◎			◎			△					○		○	
		파쇄대 규모(폭)		○	◎	◎			◎			○		△			
		지하공동유무	○	◎	◎	◎			◎			△				○	
		가스부존위치 (암질·지층 비율)	◎	△	◎	◎	◎		○			△	○	○		△	
	지하수	대수층 위치		○	○	◎			○	○		○		△	△	○	
		대수층 투수성	△			△		◎	◎	◎							
		대수층 수압	△			△		◎	◎								
	지질 상태	불연속면 간격	◎		◎	◎	◎										
		불연속면 상태	◎		◎	◎	◎										
		풍화·변질	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○		○	△	△	△	
	역학적 성질	암반강도	△	△	△	○		◎	◎	◎	○			○	△	△	
		변형계수	△					◎	◎	◎		○		○	△		
		이방성	△					◎	◎	◎							
		손상영역	△	△	△	△	○	◎	◎	◎	○	△		◎	○		
실용화 정도 ^{*5}		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	

*1 탐사가능거리 동일 기술이라도 암질 등의 암반조건에 따라 차이가 발생
 *2 준비·작업시간 ◎: 1,2 시간정도, ○: 반나절 정도, △: 1일 이상 굴착정지
 *3 해석시간 ◎: 거의 실시간, ○: 수일이내, △: 1주일 이상
 *4 조사항목에 관한 평가 ◎: 신뢰성 있는 정보, ○: 경향을 파악할 수 있는 정보, △: 참고가 되는 수준의 정보
 *5 실용화 정도 ◎: 실용화 기술, ○: 시행단계 기술, △: 실험단계 기술

2. 선진시추기술 개요

선진시추기술은 막장전방 지질조건을 사전에 파악할 수 있을 뿐만 아니라 막장전방의 수압을 경감시킴으로써 터널시공 중 막장면의 안전성 및 작업효율을 향상시킬 수 있다. 이러한 막장 전방에서의 선진시추기술은 시추목적에 따라 표 2와 같이 분류할 수 있다.

선진시추는 터널굴진속도에 심각한 영향을 미치지 않는 기간 안에 실시하는 것이 바람직하다. 굴착작업을 전면 중단하고 시행하는 주입용 시추를 제외하고는 가능한 단시간(반일 혹은 1일 정도)에 수행할 수 있도록 계획되어야 한다. 선진시추 굴진속도를 향상시키기 위한 요인으로는 크게 굴삭시간 자체의 단축과 시추과정에서의 룯드(rod) 탈부착 시간의 단축을 들 수 있다. 굴삭시간에 영향을 미치는 주요 요인으로는 선단부 빗트(bit)의 회전(혹은

타격)속도, 빗트에 가해지는 하중, 선단부에서의 슬라임(slime) 제거(일반적으로는 송수에 의해 제거) 등을 들 수 있다. 상기 요인들은 상호보완적으로 굴진속도 향상을 위해서는 현장지질조건에 맞게 적절하게 조합되어야 한다.

시추공 굴진속도와 함께 시추공 곡률을 제어하는 것도 중요하다. 예를 들어, 직경 10cm, 길이 100m의 시추공의 경우 직경과 시추공 연장의 비가 1:1000으로 이는 직경 1mm, 길이 10m의 바늘을 제어하는 것에 비유할 수 있다. 선진시추에서 방향을 제어하여 직선성을 유지하는 것은 이러한 바늘의 선단부를 바늘 끝단을 잡고 제어하는 것과 유사하고 선진시추공의 연장이 길어질수록 시추공 곡률 제어는 더욱 어려워진다고 할 수 있다.

시추공 곡률 발생의 주요원인을 정리하면 표 3과 같다.

시추공 곡률 방지를 위해서는 정밀 계측에 의한 시추공 곡률 측정을 적절한 빈도로 실시하고 기계적 요인에 의한

표 2. 터널 시공중 실시되는 시추

시추종류	주요 목적 및 특징
지질조사 시추	막장 전방의 지질조건을 사전에 파악할 목적으로 실시 슬라임(slime)*, 용수량, 굴진속도, 회전수, 추력, 토크(torque) 등으로부터 공학적 지질정보를 획득 일반적으로는 코어 회수 방식이 행해지나 터널굴진속도 향상을 위한 목적으로 천공난이도 및 용수량 등의 기본적인 정보만 수집하는 코어 비회수 방식도 실시
물빼기 시추	막장면 전방의 지하수 혹은 가스에 의한 압력을 사전에 경감시킴으로써 막장면의 자립성을 향상시킬 목적으로 실시 물빼기 시추공을 터널굴착 예정단면에 지나치게 근사시킬 경우 지하수 유동 통로를 제공함으로써 지하수압에 의한 붕괴사고가 발생할 수 있음
주입용 시추	막장면 전방의 (강도 및 투수성 측면에서) 불량한 지반을 주입공법(그라우팅) 및 동결 공법으로 개량하기 위한 목적으로 실시
기타	록볼트 및 앵커 시공용 통기 및 재료 투입용 시추공(; 상향굴착(raise boring)시 대규모 리밍빗트(reaming bit)로 확공하기 이전에 천공하는 파일럿 시추공)

*슬라임(slime): 시추공 굴삭시 배출되는 암석 분진

표 3. 시추공 곡률 발생 주요 요인

기계적 조건에 의한 요인	시추공 직경에 비해 룯드 직경이 작은 경우 룰드의 결함(휘어져 있거나 마모된 경우, 두께 부족 등) 송수량이 적거나 마모된 bit의 사용 등
지질조건에 의한 요인	층리, 편리, 절리 등 균열이 발달한 경우(이들 불연속면에 대해 수직으로 기울어지는 경향이 있음) 연암과 경암의 강도차가 확연한 경우

곡률 발생을 최소한으로 억제할 수 있도록 해야 한다.

한편, 이러한 시추공 곡률 발생현상을 역이용하여 시추공 굴진방향을 자유롭게 제어하는 방향제어시추(controlled drilling)기술이 개발되어 보급되어 왔다. 방향제어시추의 경우, 주로 터널 입구부에서 터널중단노선을 따라 선진시추를 실시함으로써 터널노선 전체에 대한 지질조건을 사전에 파악할 수 있는 이상적인 기술이다.

3. 선진시추기술의 종류 및 특징

선진시추기술은 코어 회수 방식과 코어 비회수 방식으로 구분될 수 있으며 이는 현장의 조사목적, 지질상태(암반 강도), 천공장 등에 따라 선택된다. 대표적인 선진시추 굴진공법을 정리하면 표 4와 같다.

코어 회수 방식은 일반적으로 선단부에 코어튜브라 불리는 코어를 수납, 보호하고 시추공 입구까지 운반하는 장치가 부착되어 있다. 시추공 입구에서 코어를 회수하기 위해서는 연결된 룯드(일반적으로 3m)를 하나하나 탈착시켜야 하기 때문에 시추공 길이가 길어질수록 룯드의 탈부착에 소요되는 시간이 방대해 진다. 이를 극복하기 위해서 룯드의 탈부착없이 코어튜브만을 인출해내는 와이어라인 공법이 개발되어 보급되어왔다(그림 1 및 2).

SR(Shield Reverse)공법은 선단부 코어튜브로 인한

저항으로 굴진속도가 감소하는 점을 극복하기 위하여 코어튜브를 사용하지 않고 코어를 회수하는 공법이다(그림 3). 일반적인 시추공법에서는 내관(內管)을 통해 굴착수를 주입하고 배수는 외관(外管)과 시추공 사이의 빈 공간을 통해 배출되나 SR 공법에서는 외관이 케이싱 역할을 하고 내관이 굴진해 가면서 내관과 외관으로 이루어진 이중관 사이의 빈 공간을 통해 굴착수를 주입, 선단부에서 굴착수 및 용수가 내관을 통해 코어와 함께 배출되는 공법이다. 회수된 코어는 시추공 연장에 해당하는 길이를 굴착수 및 용수와 함께 이동하기 때문에 연암 암반에서는 적용이 곤란한 단점이 있다.

PS 와이어라인공법은 와이어라인공법을 충격회전식드릴(rotary percussion drill)에서 사용 가능 하도록 한 것으로 회전뿐만 아니라 타격에 의한 운동에너지를 병용하여 굴진속도를 향상시킨 공법이다.

이외에도 회수 코어의 교란을 방지하고 현장조건에 습윤상태를 장시간 유지할 수 있도록 한 코어팩킹(core pack drilling) 공법이 있다. 코어를 비닐로 감싸서 회수하는 방식으로 토질 지반용으로 개발되어 사용되었으나 최근에는 암반에도 적용되고 있다.

에어해머(Air Hammer) 공법은 굴착수를 사용하지 않고 룯드 내부로 압축공기를 주입하여 선단부의 피스톤을 가동시켜 암반을 파쇄하는 공법으로 파쇄된 암반 슬라임(slime)은 공기흐름에 의해 시추공 입구로 배출된다. 주

표 4. 코어회수유무에 따른 대표적인 선진시추기술의 분류

코어회수유무	천공공법
코어 회수 방식	코어튜브(Core Tube)에 의한 공법
	와이어라인 공법(Wire Line공법)
	SR(Shield Reverse) 공법
	PS 와이어라인 공법(Percussion 와이어라인공법)
코어 비회수 방식	해머(Hammer)공법(공압, 수압, 유압 해머)
	Navi-Drill (Downholemotor) 공법
	웰만 공법
	코어 비회수 bit (Tricone bit) 공법

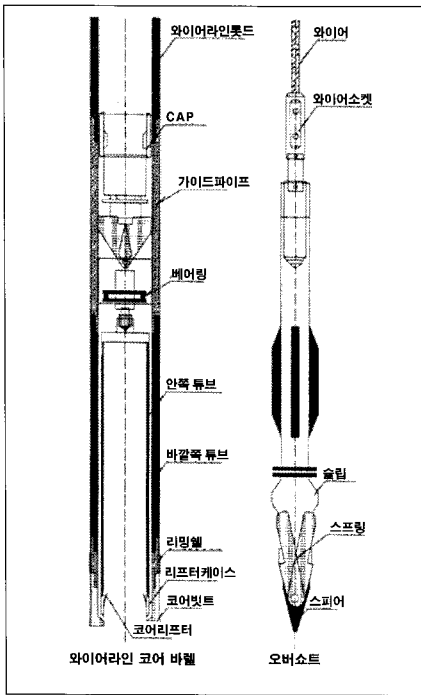


그림 1. 와이어라인 코어튜브

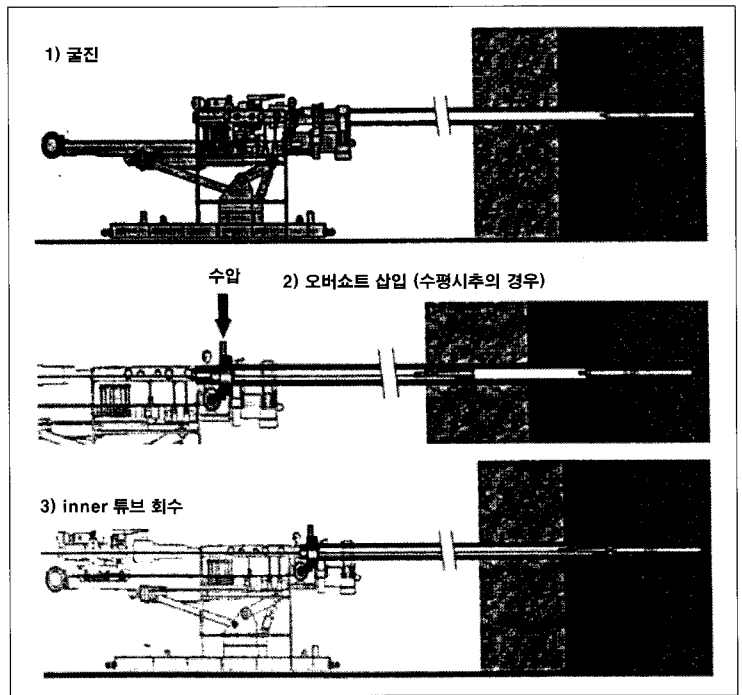


그림 2. 와이어라인공법에서의 코어 회수

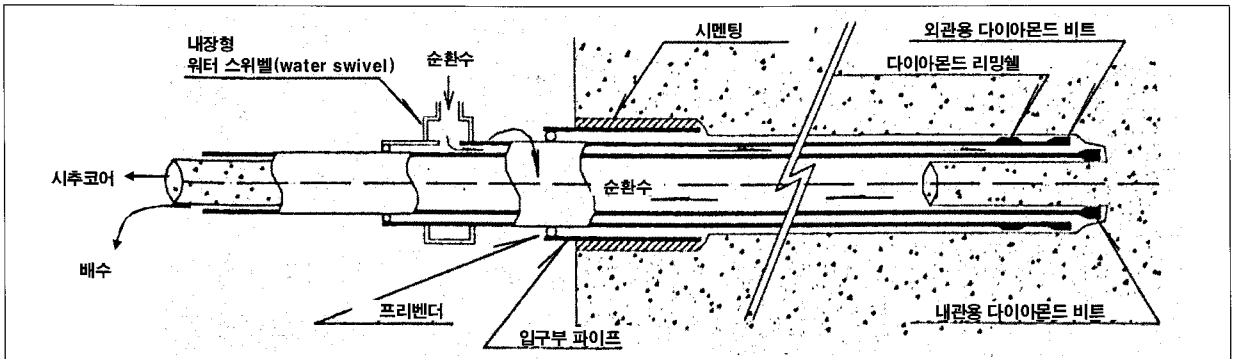


그림 3. SR공법의 개념도

로 극경암 및 경암 암반에 사용되며 급수시설 등이 불필요하기 때문에 토양 및 지하수 오염을 방지할 수 있는 특징이 있다. 에어햄머 공법에 요구되는 최소공기압은 0.7MPa로 시추공 굴진장이 길어지거나 용수량 및 용수압이 높을 경우 타격력이 저하하는 단점이 지적된다. 수압

햄머 공법은 에어햄머 공법과 동일한 원리로 압축공기 대신에 13~18MPa의 수압을 작용시켜 타격력의 전달 효율을 증진시키고 사이클(cycle)을 단축시킨 방식이다. 에어햄머 공법에 비해 소음과 분진 발생이 적고 윤활유를 사용하지 않기 때문에 친환경적이다.

Navi-Drill 공법은 일반적으로 회전시스템(다운홀모터)이 천공기에 장착되어 룯드가 회전력을 전달하는데 반해 선단부 비트(bit)에 연결된 회전시스템에 의해 굴진하는 방식으로 룯드의 탈부착 없이 비트가 마모될 때까지 연속적인 굴진이 가능한 장점이 있다.

웰판공법은 latch 및 locking 기구를 활용하여 내관 선단부에 장착된 bit로 굴진하고 bit 교체는 수직시추에 있어서는 와이어라인 방식으로, 수평시추에 있어서는 이중관을 활용하여 내관 만을 탈착하여 bit를 교체하는 방식이다. bit 교체에 따른 공벽붕괴 위험을 경감시킬 수 있는 장점이 있다.

선진시추에서는 코어 회수를 통한 지질정보 획득과 함께 용수량 및 용수압 정보도 얻을 수 있다. 와이어라인 공법 및 PS 와이어라인 공법에서는 안쪽튜브(inner tube)에 의해 선단부가 밀폐된 상태이기 때문에 코어 회수 과정에서 안쪽튜브가 회수된 상태에서만 용수량 측정이 가능하다. 반면에 SR공법의 경우, 송수 펌프를 중단한 후 내관으로부터 배출되는 양을 계량함으로써 용수량 측정이 가능하여 실시간 계측이 가능하다.

3.1 막장면에서의 선진시추기술

막장면에서의 선진시추기술은 시추공 길이에 따라 표 5와 같이 분류할 수 있다.

3.1.1 막장면에서 실시하는 장공 시추

장공시추의 경우, 터널 갱내 작업과 병행하기 위한 가설공사가 필요하다. 주로 막장면 후방 20~50m 위치에

시추를 위한 수평갱 혹은 터널 확공을 실시하지만, 터널 굴착 작업을 중단하고 막장면에서 직접 실시하는 경우도 있다.

터널 진행방향과 평행하게 혹은 시추공 곡률을 고려하여 3~4°정도 외곽방향으로 시공한다. 특히, 막장면에서 실시할 경우 시추공을 통한 용수에 의해 막장면 안정성이 위협받을 것을 방지하기 위하여 터널 굴착면 외곽영역에 시공하는 것이 기본이다.

중단 타설각도는 코어 배출을 용이하게 하기 위하여 2~4° 정도 상향으로 설정하고 시추공 연장은 100m~최대1,000m 정도까지를 대상으로 한다.

시추공 수는 지질조사 목적인 경우 1단면에 1개, 함수대 등으로부터의 물빼기 목적인 경우, 1단면에 다수 시공하는 경우도 있다.

SR 공법의 경우, 시추공 입구에서 내관과 외관 사이로 주입한 압력수를 이용하여 내관을 통해 흘러나온 코어를 회수하기 때문에 주입수압을 지탱할 수 있는 격벽부(bulkhead)가 필요하다. 일반적으로 시추공 입구로부터 10~20m 정도 쉘드 직경보다 큰 구경의 관을 설치하고 압박과의 빈 공간은 시멘트밀크 등으로 충전하여 보강한다.

SR공법은 내관과 외관(케이싱관) 각각의 선단부에 bit를 부착하고 동시에 회전시키면서 굴진한다. 공벽붕괴 및 압박변형에 의해 토크가 상승하여 굴진이 어려운 경우에는 외관을 케이싱관으로 잔류시키고 내관과 외관의 직경을 소구경으로 교체 삽입하여 굴착한다. 따라서, 사전에 시추공 연장을 고려한 관구경의 조합(케이싱 프로그램)을 계획해 두어야 하며, 연장 300m 경우의 케이싱 프로그램 사례를 그림 4에 나타내었다.

표 5. 시추공 길이에 따른 막장면 선진시추기술 분류

시추공 분류	시추공 길이(m)
단공(短孔)	20~50
중공(中孔)	수백m 이하(단공을 제외하고)
장공(長孔)	수백m 이상(중공을 제외하고)
초장공(超長孔)	1,000m 이상

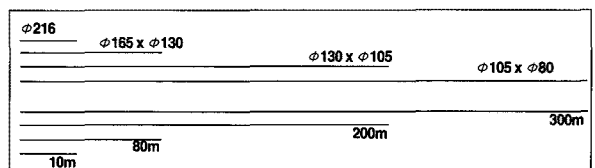


그림 4. 케이싱 프로그램 사례(연장 300m 경우)

용수량 측정은 통상적으로 실드관 접속시(1회/3m) 측정을 기본으로 하나, 굴착중에도 내관으로부터의 배수량 증가가 현격한 경우에는 송수 펌프를 멈추고 용수량 측정을 실시한다. 용수압 측정은 내관 끝단에 압력게이지를 설치한 casing head를 설치하고 압력이 상한치로 안정될 때까지 기다린 후 측정한다. 천공 완료후에는 케이싱관을 순차적으로 빼내면서 용수량 및 용수압을 측정한다.

3.1.2 막장면에서 실시하는 중공 선진시추

선진시추공으로서의 중공 시추는 막장면 작업이 정지하는 주말에 실시하는 경우가 대부분으로 준비 및 철거를 포함하여 제한된 시간 안에 100~150m 정도를 천공하는 것이 요구된다. 물빠기 시추공의 경우, 막장면의 정지시간을 최소화하기 위하여 특히 고속굴진이 요구되고, 굴삭 속도가 상대적으로 빠른 충격회전식공법(rotary percussion drill)이 일반적으로 채용된다. 통상적인 선진시추와 물빠기 공법에서는 코어 비회수 방식으로 굴진하고, 상세 지질조사를 위해서는 PS-와이어라인 공법에 의한 코어 회수가 가능하다.

시추공 연장은 40~250m의 범위로 굴착공수는 좌우 1개소로 전후의 시추공이 약 10m 정도가 중첩되도록 계획한다. 단, 용수가 많은 경우 굴착공수를 늘리거나 중첩간격을 늘린다.

시공장소는 일반적으로 NATM의 경우, 막장면 후방 수 m 이내, TBM에서는 cutter head 및 shield 후방에서 실시한다. 천공위치는 터널 측벽 SL 부근에서 실시하는 경우가 대부분으로 천공방향은 터널 축선을 기준으로 7~10°정도 외곽방향으로 하고(강지보재가 설치된 경우 지보공에 부딪히지 않는 각도), 타설 각도는 수평 혹은 3~5° 상향으로 설정한다.

천공방법으로는 충격회전식(rotary percussion drill)이 일반적으로 이용된다. 시추공 직경은 101~225mm이고, 통상적인 선진시추 및 물빠기 공법에서는 코어 비회수 방식으로 실시하고 단층 파쇄대 등의 상세지질조사에

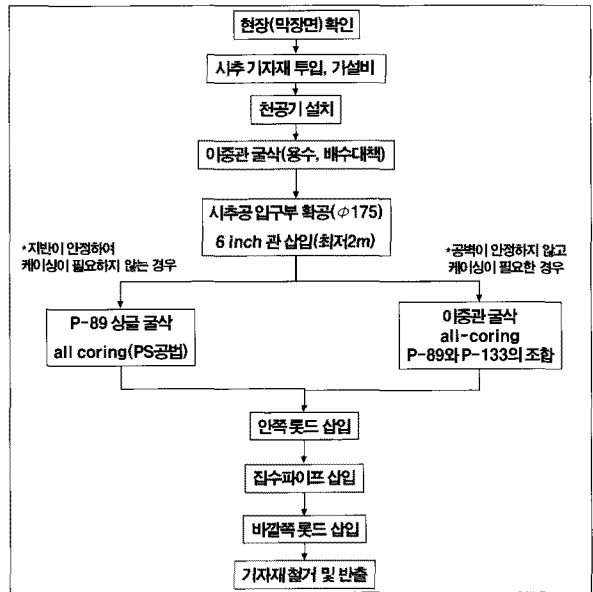


그림 5. PS와이어라인 공법 시공흐름도

는 PS-와이어라인 공법에 의한 코어 회수 방식을 적용한다. 용수가 예상되는 경우, 배수처리시설 및 시추공 입구를 확공한 후 sleuth valve가 연결된 SGP관을 최소 2m 정도 삽입하고 고정한다. 그림 5은 PS-와이어라인 공법 시공시의 시공흐름도 사례이다.

중공 선진시추를 통해 획득가능한 정보 및 효과로서 코어비회수 방식의 경우, 지질조사 중공 선진시추에서는 slime 감정, 굴삭속도, 회전수, 추진력, 토크 등에 의한 지질판정과 용수기록(용수위치, 용수량, 용수압)에 의한 막장면 전방 지질조건을 파악할 수 있다. 중공 물빠기시추에서는 시추공 입구에 격벽관을 설치함으로써 용수압을 정확하게 측정 가능하고, 막장면 전방 50~150m 정도의 용수위치, 용수압, 용수량, 지질정보를 획득함으로써 막장면 안정화 공법으로서의 물빠기 공의 규모를 판단 가능하다. 붕괴성 암반 및 미고결 암반에서도 이중관 굴삭 방식과 strainer관을 설치함으로써 암반 교란을 최소화 하는 물빠기를 실시할 수 있다.

3.1.3 막장면에서 실시하는 단공 선진시추

장공 및 중공 선진시추의 경우, 가능한 한 막장면 굴착 작업에 지장을 미치지 않도록 하기 위하여 굴착 작업의 휴식기간 혹은 막장면 후방에 시추작업을 위한 별도의 공간을 마련하고 실시한다. 단공시추는 터널 굴착용 드릴점보에 탑재된 천공기로 막장면 전방 20~50m 정도까지 코어비회수 방식으로 굴삭한다. 현장에 상주하는 드릴점보 및 작업원에 의해 실시되기 때문에 작업이 용이하고 단시간에 저가의 비용으로 실시 가능한 장점이 있다. 따라서, 임기 응변적인 대응이 가능하고 굴착 사이클(cycle)에의 영향도 비교적 적은 방법이다.

천공과정에서 얻어지는 천공속도, 타격 에너지 등의 정보로부터 막장면 전방 압반을 정량적으로 평가하는 천공 검증도 가능하다. 특히, 급속시공을 위한 TBM 공법에서는 전방지질조건을 신속하고 정확하게 파악하는 것이 중요하여 이러한 천공검증을 실시하는 경우가 많다.

물빼기 공법의 경우, 가능한 한 빨리 함수층을 파악하여 충분한 시간동안 물빼기를 실시해야 하므로 장공 및 중공 시추를 통해 이뤄지는 경우가 많다. 그러나, 경우에 따라서는 막장면 주변 물빼기 충분히 이뤄지지 않는 경우가 발생하여 막장면 전방의 확실한 물빼기를 실시할 목적으로 단공 시추를 병행 실시한다.

시추방법은 NATM의 경우, 발파장약공 및 록볼트공 굴착에 사용되는 드릴점보에 탑재한 천공기를 사용한다. 룯드 연결을 위한 작업공간으로 통상적으로는 bench를 이용하나 천단부 등은 man-cage를 활용할 수도 있다. TBM의 경우, 시추공 굴삭목적의 착암기가 장착되어 있지 않기 때문에 별도의 착암기를 장착하거나 rail jumbo를 배치한다.

단공 천공 및 천공검증은 현장에 상주하는 기계를 이용하여 실시 가능하기 때문에 터널 노선 전체에 대해 실시하는 것이 바람직하다. 특히, TBM 공법의 경우 불량 지반에서 구속될 경우 복구에 소요되는 시간 및 비용이 막대하므로 천공검증에 의한 전방탐사가 효과적으로 사용

될 수 있다.

double shield 등과 같이 전방에의 천공이 곤란한 경우에는 터널내 반사법탄성파 탐사를 이용하여 불량지반의 위치를 사전에 파악하고 직전에서 천공하여 조사하는 방식을 채용한다.

천공검증시의 시추공 직경은 $\Phi 64\text{mm}$, 길이 30~50m 정도로 직전의 조사공과는 5m정도 중첩시켜 막장면 당 1공을 시추하는 경우가 일반적이다. 천공검증을 실시하는 경우, 시추공 연장이 길어짐에 따라 시추공 곡률 및 편향, 룯드(rod) 무게의 영향 등으로 인하여 조사 결과의 정밀도가 감소하기 때문에 30m 정도로 하는 것이 좋다.

NATM의 경우, 룯드 연결 공간을 고려하여 bench 상부 1m 정도의 높이로 터널 축과 평행하게 막장면에서 천공한다. TBM의 경우, 천단부 지보재(roof support)의 직후방에서 천단상부를 향해 10° 정도의 각도로 천공한다. TBM의 경우, 천공 방향을 결정할 때 jamming에 의해 시추 룯드가 회수불능상태가 되어 굴착예정면 내에 남아있게 될 경우 TBM 굴진에 지장을 주기 때문에 시추공 편향 등을 충분히 고려하여 굴착예정면을 침입하지 않도록 유의해야한다.

단공 물빼기 시추공은 막장면 부근의 지하수를 확실하게 제거하기 위한 목적으로 막장면 좌우 2개소를 천공한다. 불균질한 지질조건으로 인해 지하수가 남아 있을 경우에는 천단부에도 추가로 천공을 실시한다. 시추공 연장은 50m 정도로 직전에 실시한 물빼기 시추공과의 중첩은 막장면 지질조건에 따라 5~10m 정도로 격벽부(bulk head)를 남길 정도로 한다. 천공 방향은 시추공 끝부분이 터널 굴착예정면으로부터 외곽 1D 정도 영역까지의 물빼기가 가능하도록 설정한다 (그림 6).

3.2 터널외곽에서의 방향제어시추

3.2.1 와이어라인에 의한 방향제어시추

와이어라인에 의한 방향제어시추는 터널 굴착 전에 굴

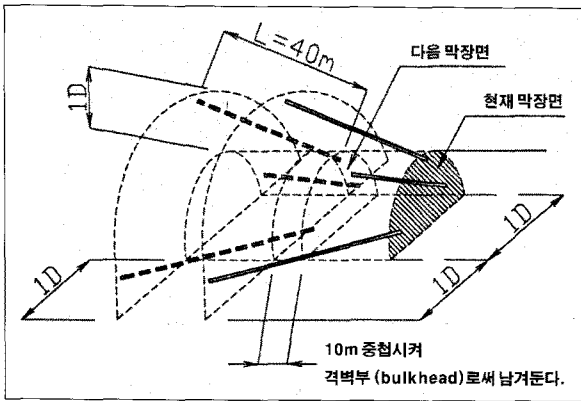


그림 6. 단공 물빼기 시추 개념도

착예정단면의 지질상태를 직접 확인하고 파악할 수 있다는 점이 가장 큰 장점으로 들수 있다. 본 공법은 노르웨이 공과대학과 DEVICO社에 의해 개발된 공법으로 노르웨이 특유의 피코르도 지형에서 터널 굴착을 위해 착안되었다. 상부 피복층 두께가 낮은 (일반적으로 100~150m 정도) 지상에서 경사방향으로 시추하여 조사 대상 구간에서 수평으로 방향을 수정하여 굴진하는 방식이다.

와이어라인공법은 코어회수방식으로 터널 종단방향으로의 상세지질정보 획득이 가능하고, inner tube를 뺀 상태에서는 용수량 파악도 가능하다. 최대장점은 터널 외부로부터 터널 예상심도의 조사가 가능하고 시공중 터널 갱내 작업에 영향을 미치지 않는 점을 들 수 있다.

시추과정에서 방향제어를 위해서는 일정 수준 이상의 압축강도(10MPa) 이상이 요구된다. 상부피복층이 100m 이하인 곳에서 시추를 시작하고 상부 피복층이 100m인 경우, 60~70m 지점부터 방향제어를 시작한다. 방향제어까지는 코어를 필요로 하지 않기 때문에 코어비회수 방식으로 급속 굴진하고 방향제어를 위한 종단 방향으로 경사는 20~45도 내외로 설정한다.

터널 종단위치보다 5m 이상 하부에 위치하여 평행하게 굴착함으로써 물빼기 시추공으로서의 역할을 수행하여 사전 수압 경감이 가능하다. 그러나, 시추공 궤적과 터널

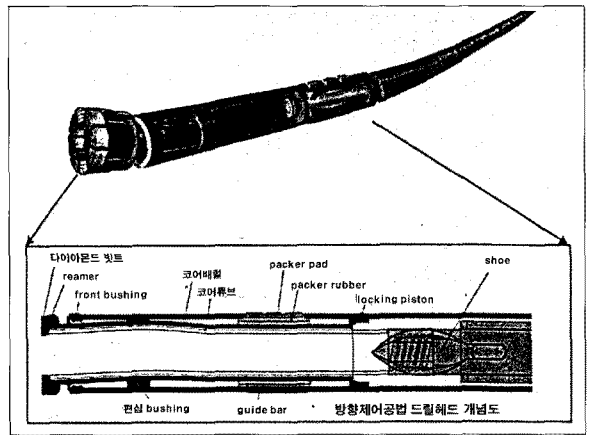


그림 7. 방향제어시추에서의 드릴헤드

표 6. 와이어라인 공법에 의한 방향제어시추의 특징

장점	1) 코어 회수가 가능하여 터널 심도의 수백m 구간의 지질조사가 가능 2) 터널 굴착과정에서의 영향이 전혀 없음
단점	1) 방향제어 개시 지점의 암반이 점토화되었을 경우 제어의 정밀도가 저하 2) 와이어라인은 코어튜브 방식이기때문에 0.7 MPa 이상의 용수압 조건에서는 굴진이 곤란함.

평면위치가 교차할 경우, 지하수의 이동 경로를 제공하게 되어 터널굴착 과정에서 오히려 막장면의 자립성을 저하는 역효과를 가져올 수 있으므로 유의해야 한다.

퇴적층을 대상으로 할 경우에는 지층 주향 방향을 고려하여 궤적방향을 결정한다.

현재까지 와이어라인공법으로 드릴헤드(drill head)가 개발되어 있는 것은 NQ(75.31mm), BQ(59.96mm) 사이즈이다. 따라서, 목적인 터널 하부 궤적까지는 NQ로 굴착하고 BQ는 이후의 수정용으로 사용한다. 궤도 진입 후에는 NQ를 HQ(97.5mm)로, BQ를 NQ로 확공하는 것을 고려하여 굴진 계획을 수립한다.

3.2.2 선단구동식 방향제어시추

롯데 및 케이싱 파이프는 회전하지 않고 선단부의 다운

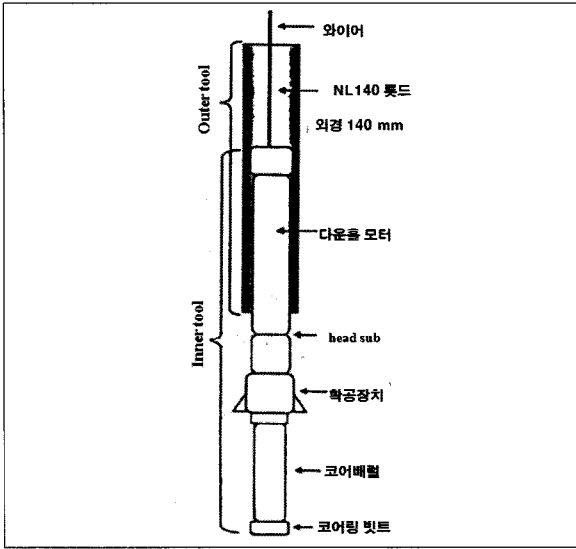


그림 8. 선단구동식 방향제어시추

홀 모터를 구동시켜 굴진하는 방식으로 공벽붕괴를 방지하기 위한 목적으로 굴진과 동시에 케이싱 파이프를 압입하는 방식이다(그림 8). 압입시 저항을 최소화하기 위하여 선단부 비트는 확공하는 방식으로 설계된다. 선단구동식 시스템은 당초 굴착 중 다량의 용수 위험성이 있는 구간에서의 지하수위 저감 목적으로 개발되었다.

일반적으로 코어비회수 방식으로 지질정보는 배출되는 슬라임(slime) 감정을 통해 획득한다. 급속시공 및 초장대 시추를 목적으로 하고 주로 지하수 조사를 목적으로 사용된다.

선단구동식 모터를 사용하기 때문에 와이어라인공법에 비해 대구경이고 케이싱의 강성이 높다. 케이싱은 회전하지 않고 다운홀 모터에 의해 끌려가는 형태이므로 방향제어 각도에 상대적으로 제약을 많이 받는다.

시추공 직경이 케이싱 직경보다 커야하기 때문에 확공식 비트를 사용하고, 비트 교환시에는 케이싱 내경보다 작아질 수 있도록 설계해야 한다.

와이어라인공법에 비해 방향제어 반경이 커지기 때문에 상부피복두께가 낮은 곳을 설정할 필요가 있다. 일반

표 7. 1000m 이상의 굴진계획 프로그램 사례

1단계: 0~30m
tri-corn bit(244.5mm) 굴진 케이싱 직경:216.3mm(굴진 후 삽입)
2단계: 30~300m
다운홀 모터(120.6mm) 굴진 확공시의 bit 직경:184.0mm 케이싱 직경:177.8mm(추종형)
3단계: 300~700m
다운홀모터(88.9mm) 굴진 확공시의 bit 직경:146.0mm 케이싱 직경: 140.0mm(추종형)
4단계: 700~1000m + α
다운홀 모터(73mm) 굴진 확공시의 bit 직경: 112.0mm 케이싱 직경: 105.0mm

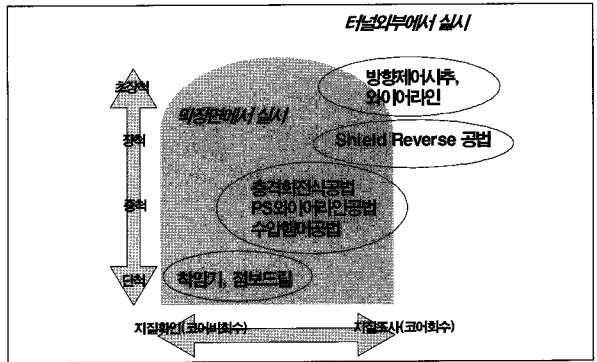


그림 9. 선진시추기술의 적용범위

적으로 굴진장 100m에 대해 약 5도 정도로 계획한다.

천공기는 SR 공법에서 사용하는 top drive 방식을 사용하기 때문에 시추공 입구에서의 굴진각도는 20도 이하가 된다. 시추공 입구에서 20~30m는 표토층 및 풍화대인 경우가 많으므로 tri-corn bit로 굴진하고 8인치 이상의 관 삽입후 시멘팅을 하여 고정한다. 범용성 있는 다운홀 모터 직경으로는 120.6mm, 88.9mm, 73mm가 알려져 있다.

이상의 선진시추기술의 특징 및 코어회수 유무에 따른 적용범위를 요약하면 그림 9와 같다.

4. 선진시추기술 시공사례

4.1 시공전 터널 외부에서 실시하는 지질조사용 방향제어시추

신칸센 터널(九州新幹線筑紫トンネル)에서의 와이어라인에 의한 방향제어시추 사례로 최장 12,115 km, 최대 토 피고 500m로 지표에서의 시추 조사가 곤란한 지역이 많아 고밀도 전기탐사에 의한 사전지질조사를 수행하였다. 이는 터널 노선 주위에 갈수기 대책으로서의 용수 저장댐이 다수 위치하여 지하수 조사에 중점을 두었기 때문이기도 하다. 터널 평면노선 역시 댐에 영향을 최소화하기 위하여 곡선으로 계획하였고, 상세지질조사를 위해 이하의 2개소에 대해서 방향제어시추 조사를 실시하였다.

- 전기탐사 결과, 파악된 화강암 풍화대에서 전기비저항치가 모두 동일한 값을 보이기 때문에 시추를 통한 코어 판정을 실시
- 전기탐사 결과의 비저항치로부터 선명한 파쇄대의 lineament가 파악되었고 단층파쇄대의 토피고가 200m 이상으로 연직시추에 의한 탐사가 비효율적으로 판단된 구간에서 실시

하천 부근의 저토피고를 선정하여 최초 경사 17°로 시추를 시작하여 총연장 500m를 계획하였다. 시추공 직경은 경사굴진구간에서 $\Phi 101\text{mm}$, 방향제어구간에서는 $\Phi 76\text{mm}$ 로 하였다. 경사측정은 경사굴진구간에서 1회/25m 빈도로, 방향제어구간에서 1회/10m, 수평구간에서 1회/20m의 빈도로 실시하였다. 최종허용정밀도는 $\pm 5\text{m}$ 로 계획하였다.

코어 비회수 방식으로 충격식회전드릴(rotary percussion drill)을 이용하여 방향제어지점까지 굴착하고, 방향제어 구간부터는 와이어라인에 의한 굴진이기 때문에 일반적인 스피들형 로터리방식으로 교체하고 경사 17°로 굴진하였다. 방향제어굴진은 통상 NQ 와이어라인으로 굴착하고 10m 마다 경사와 방위를 측정한다. 방향제어가 필요한

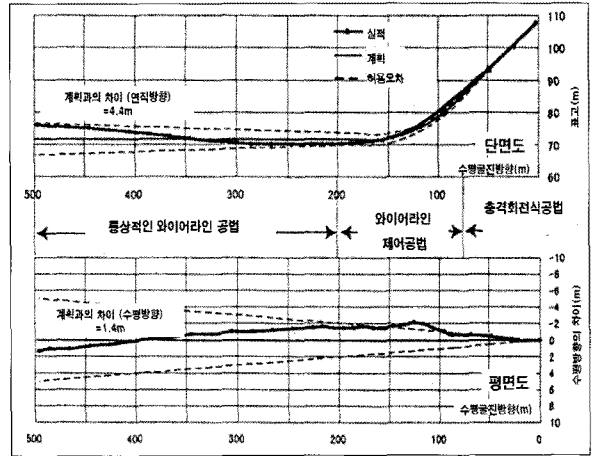


그림 10. 방향제어시추 계획도

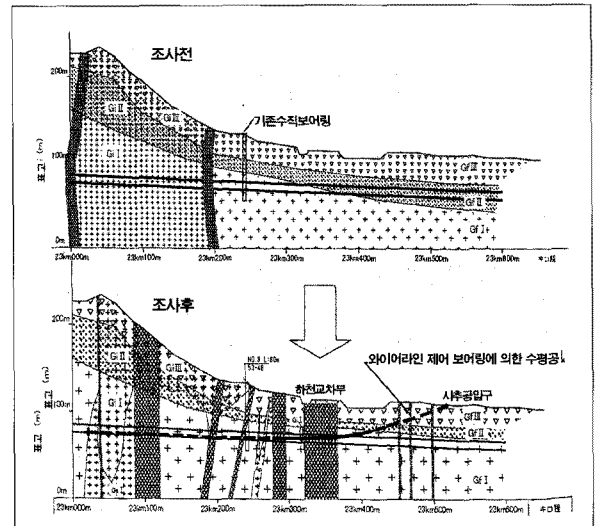


그림 11. 방향제어시추 전후의 지질단면도

부분에서만 BQ 와이어라인으로 굴착하고 NQ로 확공하는 과정을 반복하였다. 굴진심도 약 200m 부근에서 계획된 궤적에 도달하여 수평으로 굴진하였으나 400m 부근에서 궤적 상승이 관찰되어 재차 방향제어 및 수정을 실시하여 계획된 500m를 굴진하였다 (그림 10)

그림 11는 당초 예상된 지질단면도와 방향제어시추로부터 얻은 코어를 통해 수정된 지질도를 비교한 것으로

파쇄대의 위치, 암맥의 위치, 생성시대가 상이한 화강암의 경계에 이르는 정보가 상세하게 업데이트 되었음을 알 수 있다.

연직시추에서는 터널 위치와 교차정보 밖에 얻을 수 없는 것에 비하여 방향제어시추에서는 터널 종단방향 약 350m의 정확한 암반 상태를 파악할 수 있는 효과를 얻었다.

4.2 코어 비회수 방식 충격회전식공법 (rotary percussion)과 SR 공법에 의한 용수 처리 사례

산간선 터널(東北新幹線八甲田トンネル)로 총연장 26,455km의 장대터널공사로 해당공구는 총연장 4,600m, 내공단면

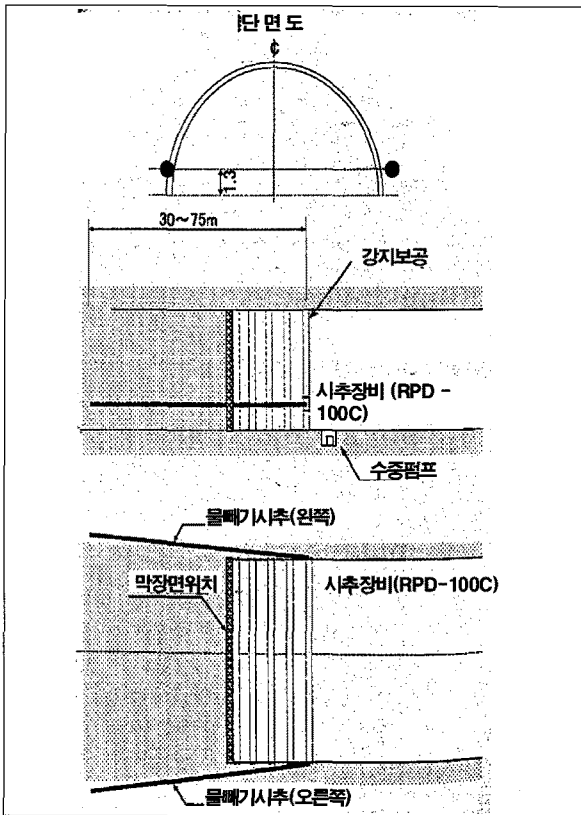


그림 12. 선진시추 개념도

적: 63.3m²로, 발파 및 기계굴착을 병용하였다.

수위 저하를 위한 deep well을 설치함과 동시에 코어 비회수 방식과 SR 공법에 의한 물빼기 시추를 실시하였다. 양수시험 결과, 지하수량은 23 l/min, 투수계수는 1.49×10^{-4} cm/sec(평균), 저류계수 2.15×10^{-4} (평균)이었다.

조사경도에서 약400 l/min의 돌발용수에 의한 막장면 붕괴 등이 발생하여 터널 입구 약450m 구간부터 지표면에서 deep well에 의한 양수와 더불어 막장면으로부터의 300m의 중공 물빼기 선진시추를 실시하였다(그림 12). 총 시공길이는 약 3,500m에 이른다.

선진시추는 1주일 간격으로 터널 굴착 정지기간인 일요일에 실시하였다. 시추는 터널 하반 막장면으로부터 4m 정도 떨어진 위치에서 터널 양측면 외곽방향으로 상향경사로 천공하였다. 충격회전식 착공기를 이용하여 길이 30~75m로 실시하고 용수가 발생할 경우 물빼기공으로 이용하였다. 직경은 보통공법에서는 101mm, 이중관 공법에서는 137mm로 시공하였다. 굴삭속도는 1m 당 3~11분 정도로 평균 1m을 4~5분에 천공하였다. SR공법에 의한 중공시추는 터널 좌우에 작업경도(폭2.5m, 길이 15.0m, 높이3.0m)를 설치하여 그림 13과 같이 4단계로

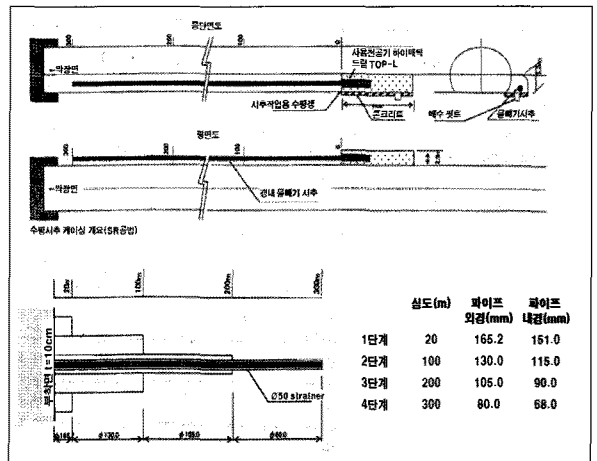


그림 13. SR공법에 의한 중공선진시추

실시하였다. 시공후 용수량은 최대 91 l/min, 평균 20 l/min정도로 물빼기 시추공의 시공효과가 확인되었다.

4.3 전방지질조사를 겸한 장공 물빼기 시추공 시공 사례

도로터널(東北自動車道飛騨トンネル)의 피난공 공사로 굴착공법은 TBM과 NATM을 병용하였으며 선진갱에서 단층대 및 점토화층이 교대로 출현하여 TBM으로부터 NATM으로 변경하였다.

전고한 암층에 협재된 연약층이 고압대수층 아래에서 파쇄되어 대량 용수와 함께 대규모의 붕괴가 발생하였다. 붕괴시 막장면에서의 용수는 1.0t/min에서부터 점차로 증가하여 1주일 후에는 5.0t/min, TBM 전구간에서 15t/min 까지 증가하였다. 토피고는 800m 정도로 붕괴지역에 지하수가 집중된 것으로 판단되었다.

TBM 후방에서 전방방향으로 물빼기 갱도를 굴착하고 막장면에 집중된 용수를 우회시켰다. 물빼기 갱도는 좌우 2개를 시공하고 왼쪽 갱도에서 SR 공법에 의한 장공 시추를 실시하였다(그림 14).

장공 시추에 필요한 가설비는 물빼기 갱도내에 설치하였다. 당초 지질조사 및 물빼기의 목적으로 1개의 시추공을 설계하였으나 용수량이 12t/min로 과다하여 천공을 중단하고 물빼기공으로만 이용하고 장공 시추를 추가적으로 실시하였다. 3개의 지질조사를 목적으로 한 시추공

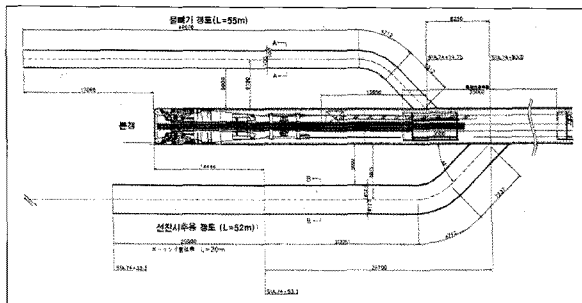


그림 14. TBM 굴진 본갱 및 조사갱의 위치도

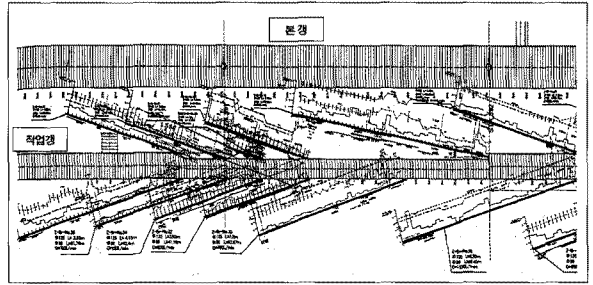


그림 15. 물빼기 작업갱에서의 물빼기 시추공

을 595m까지 굴착하였으나 최종적으로는 이들도 용수량 12t/min, 수압 2.2MPa로 물빼기공으로 이용되었다.

TBM 선단 붕괴부 주변 용수량은 1/3가량으로 감소하였으나 그라우팅에 의한 굴착면 보강은 여전히 불가능하여 2개의 물빼기 갱도로부터 다수의 물빼기 시추공을 굴착(총연장 640m)함으로써 1.0t/min까지 감소시켜 보강을 실시하였다(그림 15).

이후 40~50m 길이의 단공 시추를 1단면 당 10~15개 소 실시하여 대수층의 존재를 파악하고 TBM 굴착을 실시하였다. 1주일 물빼기를 실시하고 1일 TBM 굴진하는 속도로 굴착하여 10t/min의 용수량 조건에도 굴착이 가능하였다.

4.4 PS-와이어라인공법에 의한 막장면에서의 선진시추사례

신칸센 터널(東北新幹線八甲田トンネル大平工区) 전노선에 걸쳐 광화작용을 받은 광화변질암이 분포하여 산성 배수에 의한 중금속오염 방지 대책수립이 요구되었다. 이에 터널 시공전 사전 지질조사를 통해 광화변질암의 분포 상태를 파악하고 버력처리계획을 수립할 목적으로 PS 와이어라인공법에 의한 선진시추를 실시하였다.

공사개요를 요약하면 다음과 같다.

터널전연장: 26,455m,

표 8. 지질조사 시추사항

공법	SF공법	PS 와이어나인공법
시추공직경(mm)	330m 천공할 경우의 케이싱 직경 φ216(시추공입구부 관): 14m φ165(내관φ130): 74m φ130(내관φ105): 218m φ105(내관φ80): 330m	PS-89 천공경: φ101 outer tube: φ89 inner tube: φ60.5 drill rod: φ89

표 9. 지질조사 시추실적

터널별	터널 연장(m)	공법/사용기계	시추 회수(회)	시추공 연장(m)		
				총연장	1회당 연장	평균 연장
경사갱	738	SR공법/TOP-LS13	1	330	330	330
		PS와이어라인공법/RPD-150SL	5	425	67~104	85
본갱도	4,300	SR공법/TOP-LS13	1	200	200	200
		PS와이어라인공법/RPD-130C, RPD-150SL	57	4,283	42~156	75
합계	5,038	-	64	5,238	-	-

해당공구 연장: 본갱 4,300m, 사갱 738m
 단면적: 본갱 75.0~80.0m², 사갱 33.9~52.7m²
 굴착공법: 보조벤치병행 전단면굴착, 상방선진벤치컷 공법
 굴착방식: 발파굴착
 버력처리: 연속콘베이어벨트방식

막장면에서의 시추위치는 측벽으로부터 1m정도 떨어진 위치에서 붓드 탈부착이 용이하도록 1m정도 높이에 설치하였다. 시추방향은 경사로에서는 하향 5%, 본갱에서는 상향 1%로 실시하고, 수평방향 시추의 경우 용수가 막장면에 미치는 영향을 피하기 위하여 3° 터널외곽방향으로 향하도록 실시하였다.

4.5 소단면 TBM으로부터 선진시추 사례

TBM 굴착공법의 장점은 고속굴진으로 이러한 굴진속도향상을 위해서는 단층파쇄대 등 막장면 전방지질의 사전 파악이 중요하다. 이를 통해 TBM 굴진모드의 선택,

지보패턴의 변경, 팽창성 암반 등에서의 확공보조공법 등의 적절한 대책공법의 선정이 가능하다.

본 공사는 버력운반용의 직경3.5m, 소단면 TBM에서의 선진시추 사례(第二東名高速道路富士川トンネル, 그림 16)로 1) 본선 공사에서 발생하는 버력처리, 2) 본선 공사에 앞서 지질조건의 파악과 용수조사 기본 데이터를 획득할 목적으로 본선터널 굴진전에 시공되었다.

충격회전식의 와이어나인에 의한 코어회수를 실시하고, 천공시 굴진속도, 추력, 토크 등의 센서를 부착하여 천공에너지를 표준화하고 TBM 굴착에너지와 암반 등급과의 비교를 실시하였다. 천공방향은 굴진방향의 외곽으로 5°, 구배는 수평으로 실시하고, TBM 근접구간에서는 이중관으로, 심부천공에서는 단일관으로 실시하였다.

굴진장은 100m 이상으로 하고 직전 시추공과는 20m 정도를 중첩하여 굴진하였다. 굴진속도, 추력, 토크 등의 천공정보는 4m 간격으로 측정하였다. 3일간 100m를 굴진하는 작업공정 사례를 표 10에 나타내었다.

종래에는 코어 비회수방식으로 슬라임(slime) 색상 및 조립도 등의 변화양상으로부터 암반 등급의 판정이 곤란

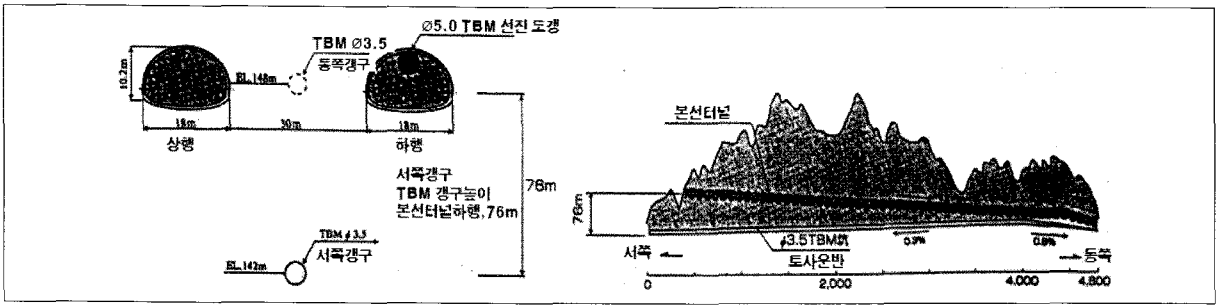


그림 16. TBM터널과 터널 본선의 위치관계도

표 10. 선진시추 작업 공정

작업일	1일 주간	1일 야간	2일 주간	2일 야간	3일 주간	3일 야간	
(1) 준비공	[Shaded]						기계설치
(2) 시추공 입구부 천공			[Shaded]				이중관(0~10m)
(3) 심부 천공				[Shaded]			단일관(10~100m)
(4) 후처리						[Shaded]	

하였으나 본 공사에서는 와이어라인에 의한 코어회수 데이터를 고려함으로써 암반등급의 판정이 가능하였다. 또한, 천공기로부터의 천공에너지와 TBM 기기로부터의 굴착에너지 변화 양상은 잘 일치하여 막장면 전방 암반의 경암 판별이 가능함으로써 TBM 고속굴진에 유용한 정보를 제공하였다.

5. 결론

국내에서도 최초의 굴착식 해저터널이 보령-안면도간 연륙도로 공사의 일부구간에 시공될 예정이다. 해저터널은 바다밑에 건설되는 특징으로 인해 조사에 많은 제약

및 어려움이 따르기 때문에 육상터널에 비해 조사 자료의 부족으로 인한 불확실성 요인이 상대적으로 크고 조사과정에서 예측치 못한 함수파쇄대 등을 통한 돌발 용수에 의한 시공 위험성이 더욱 높다. 따라서, 해저터널 시공과정 중 막장면에서의 선진시추를 통한 사전 지질정보 획득은 육상터널에 비해 더욱 필수적으로 요구된다.

본 고에서는 막장면 전방 지질조건에 대한 사전 조사 및 물빼기를 통한 막장면 안정성 향상을 목적으로 실시되어온 최근의 선진시추기술의 종류 및 특징을 알아보고 다양한 시공사례 등을 소개함으로써 국내 해저터널을 비롯한 유사 시공현장에서의 유용한 정보 제공과 함께 향후 관련 기술의 개발 방향 설정을 위한 참고 자료로서 유용하게 활용되기를 기대한다.