

# 국내 최장 도로터널(죽령터널)의 공사현황

이 영 우(코오롱건설(주), 이사), 김 동 현(코오롱건설(주), 과장)

## 1. 공사개요

대구-춘천간 고속도로(중앙고속도로)에 위치하고 있는 죽령터널은 국내 최장 도로터널로서 경상북도 영주와 충청북도 단양을 연결하는 쌍굴 고속도로 터널이며 험준한 지세의 죽령을 관통하고 있다. 현재 국도 5호선이 자연환경에 따라 힘겹게 통과하고 있으나 본 터널완성시 주행거리 및 주행시간은 대폭 단축되며, 이로 인한 산업활동 효과가 매우 클 것으로 판단된다.

본 현장에서는 T.B.M(Tunnel Boring Machine)으로 소구경 pilot 터널을 굴착한 후, 터널의 형상과 크기의 조절이 자유로운 발파공법을 사용하는 TBM-NATM 병용공법이 적용되었다. 이 공법은 터널전 단면 굴착전에 소구경 파이롯트(pilot)터널을 굴착하므로 본 굴착전에 지반상태 파악 및 발파진동의 경감효과를 얻을 수 있으며, 굴착속도가 빠른 TBM으로 선진굴착을 하게되므로 확폭구간 발파 방법 및 굴착단계 조절이 가능한 장점이 있어 단면이 큰 도로나 지하철 등에서 국내외적으로 사용이 확대되는 추세이다. 본 기고에서는 TBM-NATM 병용공법이 적용된 중앙고속도로 죽령터널에 대한 공사현황 및 공사의 원활한 수행을 위해 적용된 각종 신기술을 소개하여 유사공종 작업시 참고자료가 될 수 있도록 하였다.

## 2. 공사현황

### 2.1 지질현황

본 지역의 지질은 선캠브리아기에 생성된 것으로 추정되는 소백산 편마암 복합체의 흑운모 화강암질 편마암(Biotite Granitic Gneiss)과 미그마타이트질 편마암(Migmatitic Gneiss) 및 함석류석 화강암질 편마암(Granet-bearing Granitic Gneiss)이 기반암을 이루고 있다. 그 위를 시점부근에서는 수계에 따라 발달한 충적층이 분포하고 있으며, 종점 부근에서는 장산규암, 묘봉세일, 풍촌석회암등의 퇴적암층이 분포하고 있다. 주요 단층구조로는 죽령단층이 나타나며, 노선과 평행한 N70°W 방향과 노선과 수직방향인 N45°E 방향의 단층이 설계중점부 죽령역부근에서 서로 교차된다. 이들 단층은 모두가 습곡작용 후에 생성된 것들이며, N70°W 방향의 단층은 N45°E 방향의 퇴적암층을 거의 직각으로 절단하며, 북측이 서쪽으로, 남측이 동쪽으로 이동한 수직단층이다. 따라서, 죽령단층대로부터 파생된 단층의 출현 및 부분적으로 석회암 지역의 공동출현이 예상되었다.

### 2.2 설계현황

#### ◎ 공사개요

- 연장 : 춘천→대구 (상행선) : 4,520m
- 대구→춘천 (하행선) : 4,510m

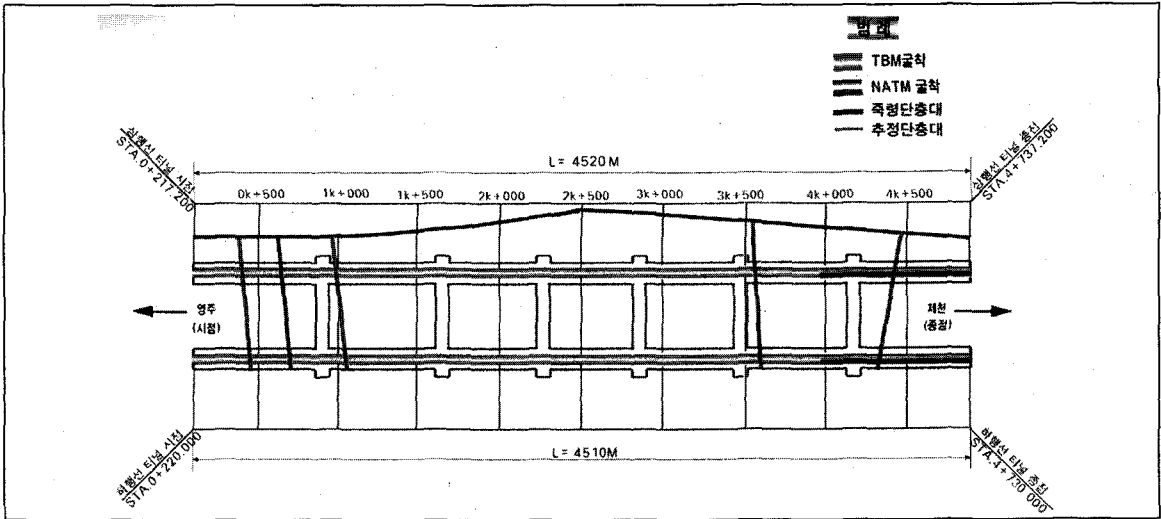


그림1 죽령터널 배치도

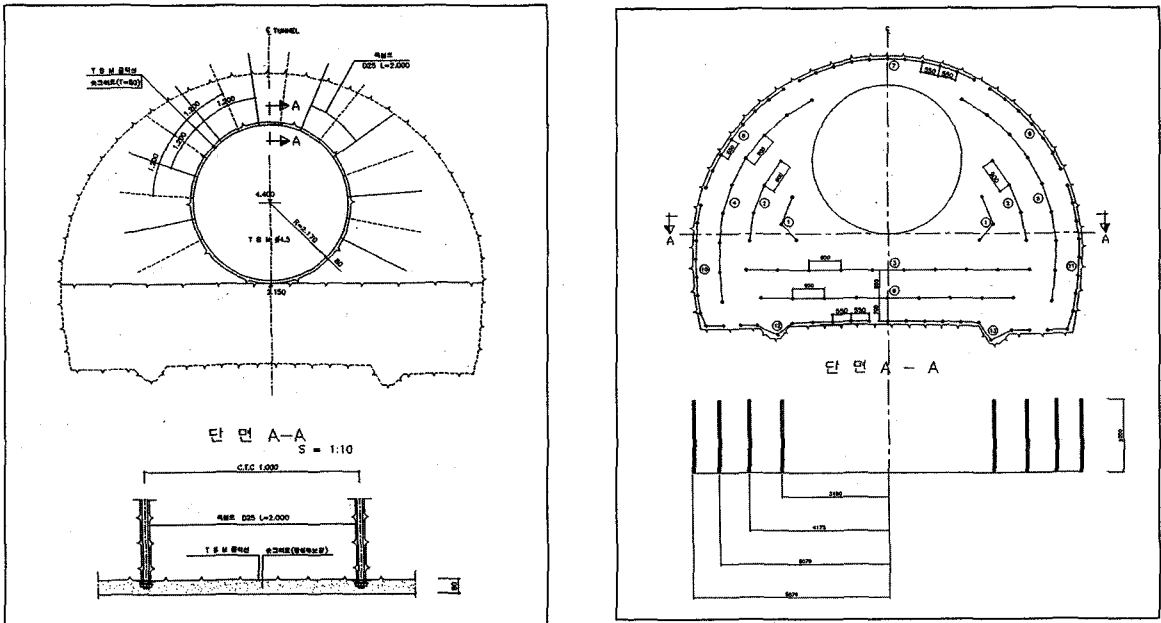


그림 2 표준패턴도 (TYPE-4)

- 단면 : 양방향 2차로 (폭원 : 10.7m)
- 굴착공법 : TBM-NATM 확공 L=7,308m (상행선: 3,644m, 하행선: 3,664m)  
순수 NATM 굴착구간 L=1,722m (상행선: 876m, 하행선: 846m)

- 환기방식 : 종류식
- 춘천→대구 : 수직갱 송배기 종류식 (1개소)
- 대구→춘천 : 수직갱 송배기 종류식 (1개소)

- 방재설비 : 터널등급 A급 일본도로공단 기준 "AA"급 포함
- 피난연락갱 6개소
- 비상주차대 13개소
- 소화설비, 통신설비 및 비상경보 설비 등

◎ 터널지보패턴

터널의 시점부는 지표면에서 터널상부까지 대략 45m의 낮은 토피고를 나타내나, 터널 중앙부분은 400m 이상의 상재하중이 작용하고 있다. 터널 전구간의 지보패턴은 주변암질에 따라 6가지 패턴으로 설계되었으며 그림 2에 TYPE-4에 대한 표준 지보패턴 및 발파패턴을 수록하였다.

TBM은 자동화된 터널 굴착장비로 터널 전단면을 동시에 굴진해 나가는 굴착기계이며, 이와 같은 터널굴착장비를 사용하여 터널전단면을 커터의 회전력과 압축력을 혼합한 압쇄 또는 절삭을 하여 굴진하는 공법을 TBM공법이라 한다. 이 공법은 화약발파시 발생하는 진동과 여굴이 없고 굴착단면이 원형 구조로 형성되어 지하공동의 굴착으로 인한 응력 재분배가 균등하게 발생되므로 구조적인 안정성 확보도 뛰어난 장점이 있다.

죽령터널 현장에 사용된 TBM의 공사수행 기록 및 장비제원은 표 1 및 사진 1에 나타내었다.

TBM 장비의 가동율은 상행선의 경우 26.5%, 하행선은 33.2%로 산정되었으며, 약70%는 TBM기계 및 BACK-UP 정비에 소요되었다. 커터교환시기는 마모율에 의해 결정되므로 우선적으로 육안판별을 하였으며, 판단이 곤란한 경우에는 전면에 부착되어 있는 게이지로 검측을 수행하여 교체시

3. TBM 제원 및 수행실적

표 1. 사용 TBM 특성

	상행선	하행선
제 원	ATLAS COPCO社	ROBBINS社
직 경	4.5 m	5.0 m
장비조립	97.06.07~97.09.08	97.08.15~97.11.01
굴착기간	97.09.08~98.07.24 (10개월 16일)	97.11.01~98.09.21 (10개월 21일)
굴착길이	3,624 m	3,646 m
굴진속도	330m/월 (최대 480m/월)	360m/월(최대 445m/월)

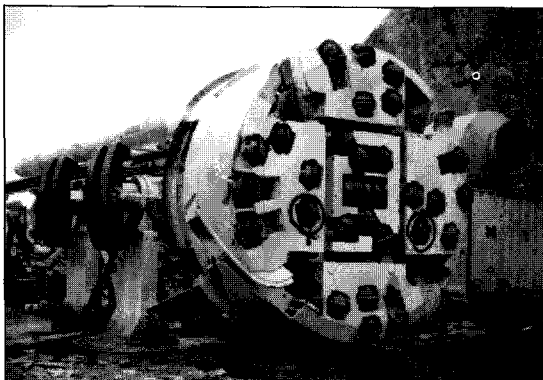


사진 1. TBM Cutter 및 굴착형상.

표 2. Cutter의 마모원인 및 대책

구분	원인	대책
I	· Bearing의 자연마모	· Cutter 분해조립시 Bearing을 분해하여 육안으로 검사하고, 손상정도가 미세하더라도 새로운 Bearing으로 교환한다.
II	· 충격에 의한 Bearing 손상	· 암질의 급변화때 흔히 나타나는 현상으로 굴진중 순간적으로 Cutter에 과 부하가 걸리지 않도록 주의한다
III	· Oil 누유에 의한 Bearing 손상	· 조립후 Running Tester에 의한 시험을 실시하여 Oil 누유를 확인한다. · Seal 두께의 균일성을 유지한다. · Seal 손상여부를 확인한 후 조립한다. · Seal의 탄력성을 확인한다.
IV	· 용접에 의한 Bearing 손상	· Retainer Ring, Tab 용접시 Bearing에 전류가 흐르지 않도록 접지선과 Lead선을 용접부 위에 최대한 짧게 사용한다. · Cutter Head용 접시 Lead선과 접지선의 간격을 최대한 짧게 한다.

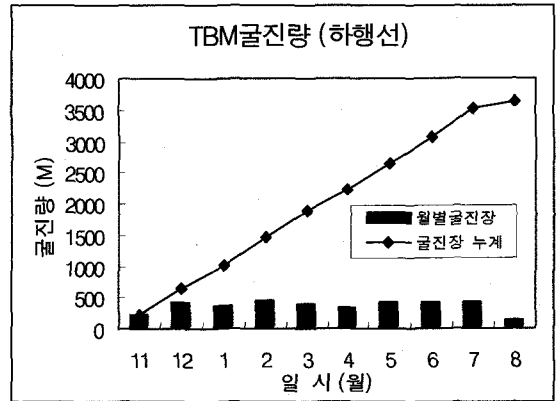
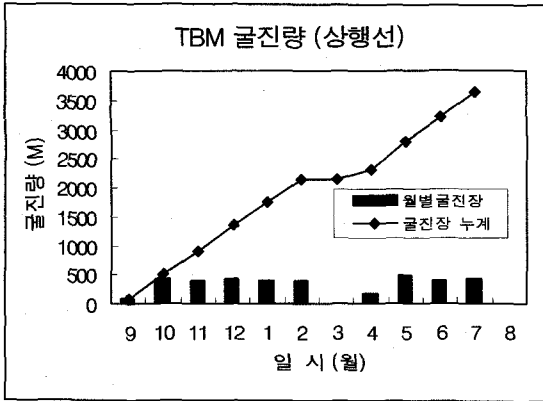


그림 3. TBM 굴진현황

기를 결정하였다.

전체적인 TBM 굴진현황은 그림 3에 나타내었 으며, 암상태가 비교적 양호하여 공사수행에 큰 어 려움 없이 17.5개월로 계획되었던 공사기간을 6개 월 단축하여 관통하였다.

#### 4. 신기술, 신공법 적용현황

##### 4.1 슛패치(Shot Patch) 공법

TBM 굴착구간은 굴착장비가 굴착단면의 대부 분을 차지하여 기존 습식 슛크리트에 의한 기계시

공이 어려워 인력에 의한 건식 슛크리트 타설이 보 편화 되어 있는 실정이다. 건식 슛크리트는 작업장 내부에 분진 및 리바운드가 다량 발생되어 내부환 기 및 작업성 불량, 장비의 손상등으로 효율적인 지 보시공 및 품질의 균일성을 확보하기 어려워 이에 대한 대응책으로 모르타르를 공장에서 배합하며 현 장에서는 인력으로 전방에서 물과 믹싱후 액상굴결 제와 혼합 시공하는 슛패치공법이 제안되었다. 이 방법은 분사장비가 작고 효율적이어서 TBM 굴착 공정에 영향이 없는 것으로 평가되었다.

당 현장에서는 슛패치공법을 주시보공법으로 적 용하였으며, 슛패치공법과 임시갱도인 본 현장의 여건을 고려하여 RMR을 이용한 무시보자립시간

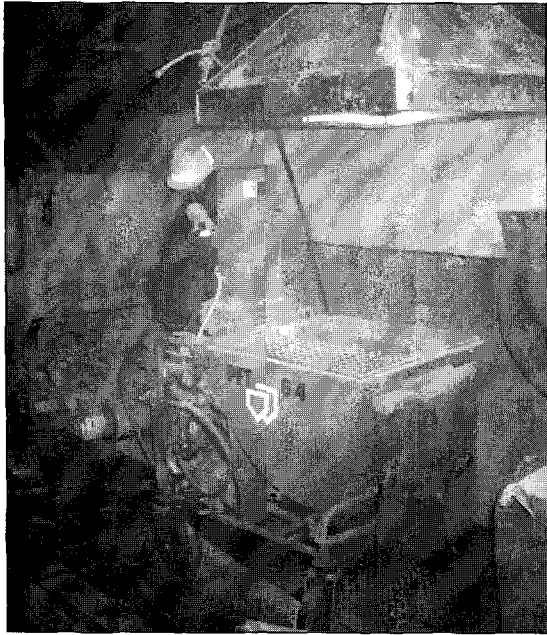


사진 2. Shotpatch 시공현황

과 Q-시스템을 이용한 표준지보패턴을 표 3과 같이 제시하였다

-shotpatch용 모르타르는 허용강도가 380kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 기존의 shotcrete에 비해 강도증진 효과가 기대되어 제안된 표준지보패턴에 대해 표 4와 같은 shotpatch 물성치로 수치해석을 수행하여 구조적인 안정성 및 타당성을 검증하였다. 특히, 본 현장에서 사용된 TBM 관통시간이 16일 정도이므로 RMR

표 3. 암반분류에 따른 표준지보패턴(안).

RMR 등급	락볼트	shotcrete	무지보자립기간
61~100	random	random	1년 이상
41~60	random	t=3cm	2주 이상
31~40	6ea/M	t=5cm	2주 이하
21~30	-	t=10cm	1일 미만
0~20	상황에 따른 시공법 강구		

표 4. 수치해석에 적용된 shotpatch 물성치

		탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비	단면2차모멘트 (m <sup>4</sup> )	두께 (m)
Shotpatch	연한 shotpatch	1.5E5	0.2	2.25E-6	0.03
	굳은 shotpatch	1.0E6			

표 5. 터널 지보패턴의 설계변경 내용

구분	당 초	변 경
shotcrete 재료	강섬유보강 shotcrete 건식 shotcrete	shotpatch용 레미탈
지 보 패 턴	I 락볼트 : 0.667개/M shotcrete 두께 : 5cm	무지보
	II 락볼트 : 5개/M shotcrete 두께 : 5cm	락볼트 : 0.833개/M shotcrete 두께 : 3cm
	III 락볼트 : 8개/M shotcrete 두께 : 8cm	락볼트 : 6개/M shotcrete 두께 : 5cm
	IV 락볼트 : 10.6개/M shotcrete 두께 : 12cm ST'L Rib : 1.25조/M	shotcrete 두께 : 10cm ST'L Rib : 1.25조/M

평가가 40이하인 지점에서는 굴착과 동시에 지보를 설치하는 것으로 계획되었다.

#### 4.2 지중응력 측정(CSIRO HI CELL)

대부분의 도로터널은 터널 연장을 가능한 단축하기 위하여 산의 중심부보다는 산줄기의 하부를 관통하도록 계획되어지므로 터널 단면의 좌우측에는 불평형의 지반하중(편도압)이 작용되어 비대칭적인 거동특성을 보이게 된다. 이로 인해 발생하는 편도압은 터널 종단상으로는 터널 입 출구부의 갱문 위치에서도 발생할 뿐만 아니라 횡단상으로는 산사면 하부를 통과하는 터널 중심부에서도 발생된다. 또한, 산악지 형성 과정에서 형성된 암반의 초기응력 상태에 따라 공동의 이완대, 지보재의 물성 등이 결정되고 응력재분배에 따른 응력분포의 크기가 결정

되어진다.

따라서, 지반내 측압계수( $K_0$ )를 측정하여 터널해석시 입력자료로 사용하여 굴착단면의 응력변화를 고려한 설계가 이루어져야 한다. 당 현장에서는 응력해방법의 일종으로 9개의 스트레인 게이지를 이용하여 공벽의 변형률을 측정함으로써 3차원 응력 상태를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 CSIRO HI CELL을 사용하여 지중응력상태를 측정하였다. 또한, 이 결과를 이용하여 터널 주변지반의 3차원 응력성분의 방향과 크기를 산정하고, 향후 터널거동의 진행사항 파악 및 불안정한 구간에 대한 수치해석시 적절한 지반계수의 파악이 가능하도록 하였다.

시험을 통해 얻은 변형률을 응력값으로 변환하기 위해서는 암반의 탄성계수와 포아송비를 알아

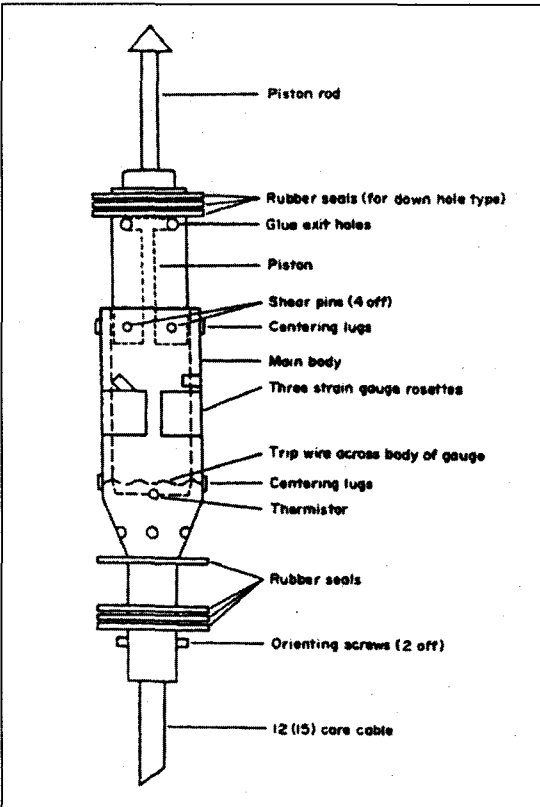


그림 4. CSIRO HI CELL의 형태

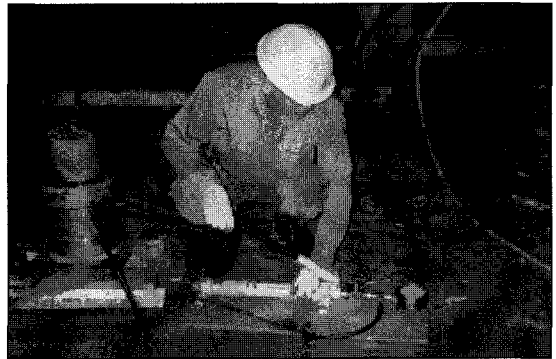


사진 3. 이축압축시험 장면

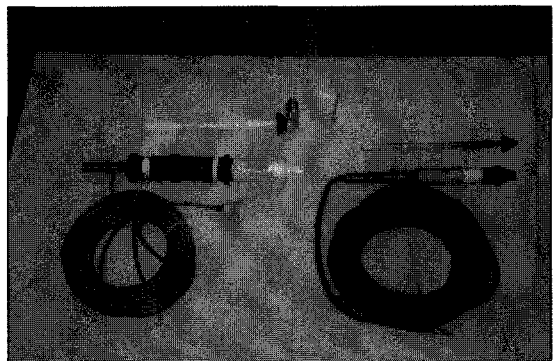


표 6. CSIRO HI CELL을 이용한 시험결과

TEST No.	일축압축시험		지중응력측정			
	탄성계수(GPa)	포아송비	수평응력(MPa)	수직응력(MPa)	축압계수(K)	
I	1	32.0	0.23	3.71	1.15	3.23
	2	36.7	0.21	1.18	1.31	0.90
	3	36.0	0.27	0.79	0.42	1.88
II	1	48.0	0.20	1.32	0.57	2.32
	2	38.8	0.28	1.74	0.53	3.28
	3	35.3	0.22	0.32	0.26	1.23

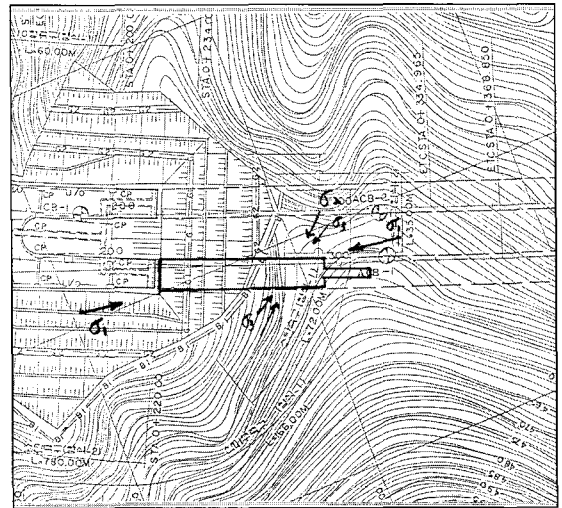
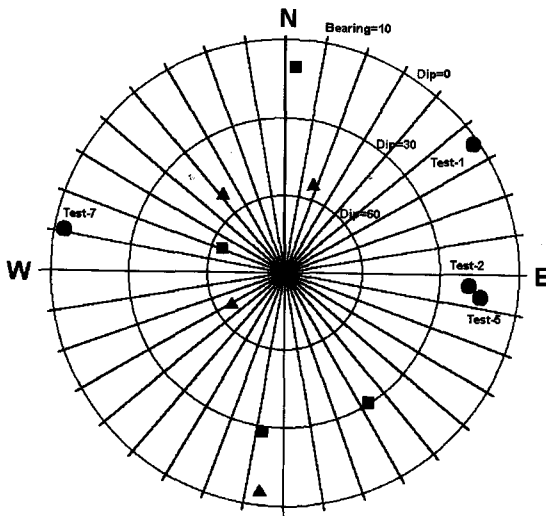


그림 5. 주응력 크기와 방향

야 하며, 이는 현장에서 일축압축시험을 통해 구할 수 있다. 일축압축시험은 응력측정후 셀이 설치된 코어(core)를 회수하여 사진 3과 같이 암석시료를 이용하여 구할 수 있다.

측정위치는 시점부로부터 약 92m 굴착되어진 지점에서 우측터널을 선택하였으며, 2개의 보아홀에서 3축점씩 총 6개의 시험이 수행되었으며, 해석 결과는 표 6과 그림 5에 나타내었다.

측정된 응력값이 작게 나타나는 곳은 암반의 응

력분포가 지질구조에 의해 영향받고 있다는 것을 보여주고 있으며, 실제 코아 회수시 절리에 의해 회수에 어려움을 겪은 지역도 존재했다. 일축압축 시험 결과, 탄성계수와 포아송비의 평균값은 각각 37.8 MPa, 0.235 정도이며, 축압계수는 2.14로 나타났다. 평균 최대주응력( $\sigma_1$ )은 약간의 경사를 가지고 북에서 동으로 약 105° 기울어져 있으며, 이 방향은 터널상부 언덕의 등고선 및 터널축과 거의 평행하다.

### 4.3 막장전방 예측

TBM굴착의 경우, 터널전방의 지질상태 파악이 곤란하여 예기치 못한 파쇄대를 만날 경우 굴착면의 붕괴로 인하여 시공에 막대한 지장을 입게된다. 이러한 문제점 해결을 위해 최근에는 터널내에서 선진수평시추를 수행하여 막장전방의 지층 상태를 미리 확인한 후 그 정보를 토대로 터널 굴착 방법과 지보 패턴을 결정하기도 한다. 그러나 이와 같은 선진수평시추 작업은 많은 시간이 소요되기 때문에 공기의 차질을 초래할 수 있고 경제적으로도 큰 부담이기 때문에 특별한 경우를 제외하고는 적용하지 않고 있다. 최근 일상적인 현장 계속 결과로부터 막장전방부 또는 좌우측으로부터 접근하고 있는 불연속면의 존재를 예측하고자 하는 노력이 수행되고 있으며, 이 탄성파에 의해 전방 지반예측을 위한 TSP나 HSP와 같은 장비의 사용이 시도되고 있다.

본 현장에서는 TBM 굴진시 현장여건상 막장전면에 접근이 어려워 막장 관찰 등의 기초자료 조사가 매우 어려운 실정으로 막장전방 지반특성을 예측하여 안전시공 및 터널주변의 물성치 파악으로 최적설계를 이룩하기 위한 방편으로 TSP탐사가 시행되었다. TSP탐사는 막장부근에서 터널 벽면에 천공을 하고 극소량의 화약으로 발파시켜 발생한 탄성파가 터널전방의 지층대에서 반사되어올 때, 터널측벽 양쪽에 설치되어 있는 수신기로 수신하여 내장 소프트웨어로 분석하는 방법이다 (그림 6 참조). 반사파 분석결과로부터 터널 중심축을 기준으로 좌우측면 및 상(천정부), 하(하단부)측의 지반특성을 알 수 있으며, 이 방법은 터널막장 후방에서 시행되므로 굴진작업에 방해가 없다는 것이 최대 장점이다.

TSP 측정을 통한 막장 전방의 지반특성 예측범위는 토사지역 50~100m, 경암지역 200~300m, 최대 700m까지 예측이 가능하다. 일반적으로 정확한 예측거리는 막장 전방 100m정도인 것으로 알려져 있다. 따라서 수신기 위치로부터 막장면까지의 거리

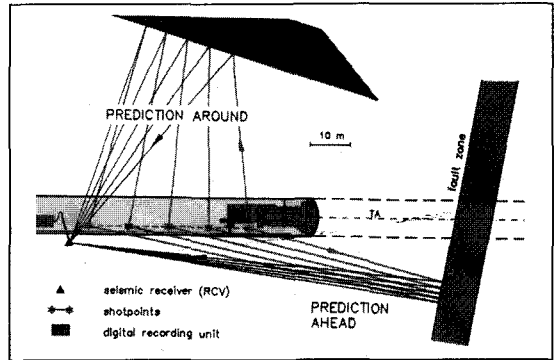


그림 6. TSP 탐사 원리

가 약 50m 임을 감안해 볼 때, 전체 TSP 측정영역 (수진기 위치~막장전방 예측 가능거리)은 150m 정도임을 알 수 있다.

표 7. Event 예측에 따른 거리오차 범위.

해석 영역(m)	오차 범위
0 ~ 50	± 5%
50 ~ 200	± 10%
200 ~ 400	± 20% 이상

TSP 측정은 총 14회에 걸쳐 실시되었으며, 측정의 연속성 확보 및 해석결과의 신뢰도 향상을 위해 측정시 전회 측정구간 중 약 100~130m 정도를 중복해서 측정하여 직접파 측정에 의한 검증을 실시하였다. 측정결과 TBM 굴진구간에서의 지질조건은 특이 지층대 없이 대부분 양호한 상태에 있으며, 용수또한 대규모 출수는 없을 것으로 나타났다.

### 4.4 3차원 계측

현재 국내에서 통상적으로 수행되고 있는 Tape Extensometer를 이용한 내공변위 측정은 터널 주변 2점간의 상대변위 측정에 국한되므로 비대칭적인 터널변위와 중방향 변위 측정은 불가능하다. 터널굴진시 지반의 강도차이로 인해 발생된 3차원 절대내공변위의 변화양상을 파악하여 막장전방의 지층변화를 미리 예측할 수 있는 방법이 연구되고



있으며, 막장전방 예측은 중방향변위와 천단침하의 비를 이용하므로 터널의 3차원 계측을 수행하여 중방향 변위를 측정하는 것은 매우 중요한 사안이라 할 수 있다.

당 현장에서는 이러한 문제점 해결 및 절대좌표계에 의한 일상계측 수행으로 터널의 거동을 관리하기 위하여 순수 NATM 구간에 3차원 계측관리 방법을 시행하였으며, 향후 확대발과 구간에서도 시행 계획중이다. 이 방법은 Tape Extensometer 방법보다 정밀도는 다소 떨어지나 터널의 3차원적인 거동특성 파악과 막장위치, 선형관리등을 병행하여 관리할 수 있어 공사 안전성 파악 및 대책수립에 효율적인 방법으로 사용이 확대되고 있는 추세이다. 현재까지 터널변위는 2~7mm 미만으로 수렴추세를 보이며, 변위의 진행속도가 큰 변화없이 진행되므로 굴착에 따른 터널 주위 암반은 안정된 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 기술보고에서는 TBM-NATM 병용공법이 적용된 중앙고속도로 죽령터널의 TBM 시공에 따른 공사현황 및 각종 신기술을 소개하였다. TBM-NATM 병용공법은 터널전단면 굴착전에 굴착속도가 빠른 TBM으로 소구경 pilot 터널을 굴착하므로 본 굴착전에 지반상태를 정확히 파악할 수 있으며, 발파진동의 경감효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 당 현장에서는 이러한 장점을 최대한 살려 경제적이고 안전한 공사수행이 가능하도록 CSIRO HI cell을 이용한 초기지중응력 측정, TSP 탐사를 통한 막장전방 지질의 예측, shot patch 공법, 3차원 계측 등 신기술, 신공법을 적용하였다. 또한, 현장여건을 종합적으로 검토하여 적절한 지보패턴을 제시함으로써 설계공사기간을 6개월 앞당겨 성공적으로 TBM 구간을 관통하였으며, 현재 확폭을 위한 NATM 공사가 진행중에 있다.

## 참고문헌

1. 코오롱건설(주) (1997), 중앙고속도로 (영주-제천간) 9공구 암반초기지압 측정보고서
2. 코오롱건설(주) (1997), 중앙고속도로 (영주-제천간) 9공구 터널안정성 검토보고서
3. 코오롱건설(주) (1998) 막장전방 지반특성 예측(TSP)을 통한 터널 최적설계 종합보고서
4. 코오롱건설(주), (주)한양 (1998) 중앙고속도로 죽령터널 TBM공사 시공보고서
4. Schubert, W. and Budil, A. (1996), "The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation", 8th International Congress on Rock Mechanics, vol. 3.
5. Walton, R. J. and Worotnicki, G. (1986), "A Comparison of Three Borehole Instruments for Monitoring the Change of Rock Stress with Time", Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements, pp 479-488