

영동선 동백산-도계간 장대터널 시공사례

A Case Study on Construction of Long Tunnel in the Youngdong Railroad (Mt. Dongbaek ~ Dokye)

김용일*, 윤영훈**, 조상국***, 양종화****, 이내용*****

Yong-Il Kim, Young-Hoon Yoon, Sang-Kook Cho, Jong-hwa Yang, Nai-Yong Lee

1. 서언

영동선 이설사업 일환으로 영동선 동백산역(강원도 태백시 연화동)과 도계역(삼척시 도계읍)간의 본 터널은 총 연장 16.4km인 장대터널로서 전북 완주 전라선 슬치터널(6.12km)보다 10km 이상 길고, 정선 고한과 태백 추전을 잇는 4.5km의 정암터널의 3배가 넘는다.

특히 이 터널은 구간의 높이 차(약 3백80m)를 극복하기 위해 Loop형태로 설계되었고, 열차의 안정성, 구난대피, 환기측면에서 단선병렬 터널로 설계되었다
또한 불량한 선형과 노후된 터널구조물로 인한 열차 안전운행 저해요인을 해소하기 위해 천공발파공법을 굴착공법으로 채택하였다

이 터널이 완공되면 동백산역과 도계역간 운행 시간이 12분으로 절반 이상 단축된다. 그러나 이 구간에서 높이 차를 극복하기 위해 지그재그식(스위치 백)으로 운행돼 관광객들의 인기를 모았던 기존 열차 모습은 사라지게 됐다.

본 공사구간은 단층대, 공동 및 함탄층등 복잡한 지질구조를 보여, 터널공사시 많은 애로사항을 가지고 있다. 본고에서는 영동선 동백산-도계간 장대터널공사구간 중 제2사갱의 지반특성, 지보설계, 굴착보조공법의 시공 현황을 중점으로 소개하고자 한다

2. 현장개요

■ 공사명

영동선 동백산-도계간 철도이설 건설공사

■ 공사기간

1999. 12. 20 - 2007. 09. 08 (94개월)

■ 공사구간

강원도 태백시 백산동-삼척시 도계읍(17km 774)

[영기(환) 92km 450.00 ~ 영기(환) 110km 223.89]

* (주)대우건설 토목기술1팀 차장, 공학박사, 정회원

** (주)대우건설 토목기술1팀 차장, 정회원

*** (주)대우건설 상무이사, 정회원

**** (주)대우건설 영동선철도현장 현장소장, 정회원

***** (주)대우건설 토목기술1팀 대리, 정회원



Fig. 1 공사노선 개요도

■ 공사내용

- 본선터널 : L=164km 240 (개착터널 320m, NATM터널 15km 920)
- 사갱터널 : L=2km 100 (사갱 1km 510, 2사갱 590m)
- 궤도부설 : L=23km 483 (본선 17km 774, 특수선 1km 168, 측선 4km 541)

■ 주요공사내용

구 분	본선부	사갱부	수직구	계
NATM굴착 (m ³)	1,094,000	126,000	11,000	1,231,000
SHOTCRETE (m ³)	61,000	6,000	1,000	68,000
ROCKBOLT (EA)	81,000	3,000	1,000	85,000
CON'C LINING (m ³)	141,000	16,000	2,000	159,000

3. 지형 및 지질특성

3.1 지형 특성

동백산-통리 및 도계-고사리를 잇는 N10° ~20° E로 발달된 두 개의 계곡을 따라 동·서에 산악이 분포하며 터널 Loop구간의 연화산(1171.2m)이 최고봉을 형성하고 있다. 심포리의 남쪽지역은 대체로 해발 850m의 산봉들이 주류를 이룬다. 터널의 시점부와 종점부의 지표고는 약 380m의 차이가 있다

3.2 지질특성

3.2.1 전체적으로 보면 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄-페름기의 평안누층군, 백악기 경상누층군과 상기지층들과 분출 및 관입관계를 갖는 백악기 화산암류 및 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 각 지층은 층상단층에 의해 수차례 반복되며 오십천단층 등의 주향이동단층에 의해 단절되어 있다. (Fig. 2)



Fig. 2 지질구조도

3.2.2 제 2사갱지역 일대는 대·소규모의 단층의 발달로 인해 지층들이 반복 분포되거나 절단되는 등 복잡한 양상을 보이며 지표는 대체로 봉적층으로 피복되어 있다.

■ 지층구성 (Fig. 3)

- 본 사갱구간은 유문암류 및 맥암류 암석, 장성층과 함백산층으로 구성되어 있다.
- 유문암류 및 맥암류 암석은 사갱의 전반부에 분포하며 암석 자체의 강도는 강하나 주변 지층인 장성층과 단층으로 접하므로 파쇄 및 균열이 심하다.
- 장성층은 사암, 세일 및 석탄층이 교호하며 전반적으로 파쇄 및 균열이 심하다.
- 함백산층은 사갱의 종점부에 주로 견고한 석영질 사암으로 구성되어 있어 양호한 지반상태를 보인다

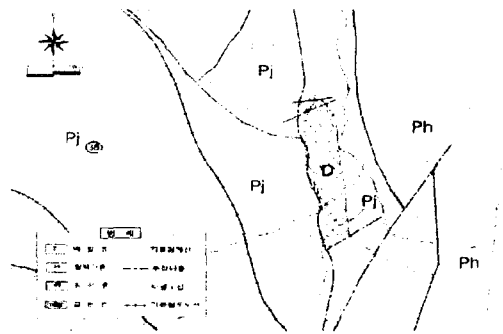


Fig. 3 제 2 사갱 부근 지표지질도

■ 지질구조

- 본 사갱구간의 단층들은 지하수의 유동 통로 역할을 하거나 탄질물을 비롯한 단층점토가 협재하여 전단강도가 현저히 저하되며 단층주변의 지반이 파쇄되어 있는 경우가 많다.
- 장성층 내에 형성된 단층을 따라 유문암류 및 맥암류 암석이 관입하였으며 갱구부 및 사갱의 전반부는 이 단층과 직접 접하거나 또는 인접하여 진행하므로 굴진시 주의를 요하는 부분이다
- 특히 STA.0K300부근은 단층 주변의 지반이 심하게 교란되어 균열 및 파쇄가 매우 심하고 균열면을 따라 탄질물과 같은 연약한 충전물이 협재하여 지반의 전단강도가 낮을 것으로 판단되며 또한 지상에 폐갱도 침출수 처리장이 위치하여 굴진시 막장으로 다량의 침출수가 유입될 가능성이 있다

4. 지구물리탐사

공사구간 중 제2사갱 입구 주변의 공동 발달상태 및 사갱예정 노선의 암반상태를 파악하고 파쇄대 및 연약대를 탐지하여 시공에 필요한 기초자료를 수집하였다. 탐사방법은 쌍극자-쌍극자 배열법을 채택한 전기비저항탐사와 GPR 탐사를 적용하였다.

4.1 조사구간

제2사갱 예정 노선의 직상부에서 노선의 종방향과 횡방향으로 전기비저항탐사가 수행되었으며 자세한 사항은 Table 1과 같다

Table 1 전기비저항탐사구간

구분	조사구간	측점간격 [m]	조사길이 [m]	비고	
제2사갱	종측선	570~420	10	150	A1
		480~300	10	180	A2
		320~200	10	170	A3
횡측선	560지점	5	45	B1	
	540지점	5	45	B2	
	450지점	7	63	B3	

4.2 조사장비

전기비저항 탐사에 사용된 장비는 스웨덴 ABEM사의 Terrameter이며, GPR 탐사에 사용된 장비는 미국 GSSI의 SIR-2 이다. 전기비저항 탐사자료해석은 한국지질자원연구소에서 개발한 DIPRO를 사용한 역산율 기초로 수행되었다.

4.3 탐사결과

제2사갱 갱문의 연약대는 계획고 수 십 m 하부에 존재하는 채굴적, 갱도의 붕괴에 따른 침하와 이에 의해 형성된 이완대로 해석되었다. 이러한 저비저항 이완대는 B1, B2 측선에서 모두 나타나므로 노선 방향으로 수 십 m 더 연장되어 있을 것으로 예상되었다. 갱문 설치부에서 수행한 GPR 탐사는 노선을 바라보며 좌측에 이상대가 좀 더 형성되어 있다. 이러한 이상반응은 이미 설치된 가시설, 그라우팅 주입 등의 영향을 받을 수 있으나 암층 이완대 등 연약대의 반응으로 해석된다. (Fig. 5, 6)

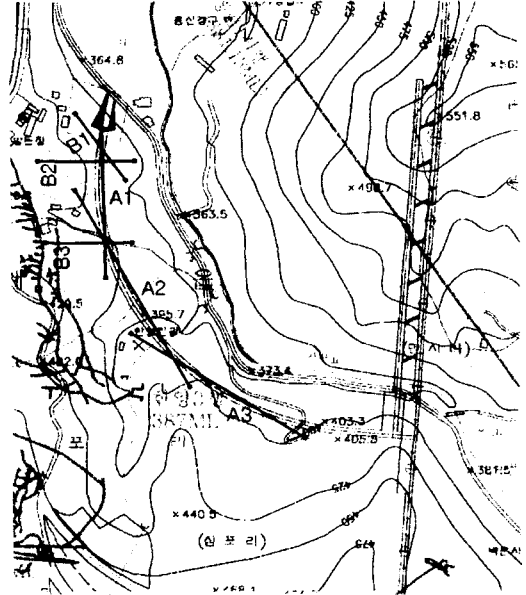


Fig. 4 제2사갱 전기비저항탐사 측선도

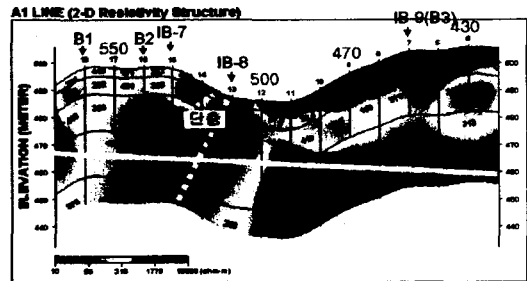


Fig. 5 제2사갱 전기비저항 종측선 (A1) 역산 단면도

5. 지보설계

터널의 지보설계는 암반공학에 근거한 지보설계를 위해서 Q-시스템과 RMR의 장점을 활용하였다. Q-시스템에서는 다양한 조건에 대한 지보패턴을 제시하지만 현장 막장관리가 곤란한 반면 RMR은 10m규모의 터널에만 제시하는 단점이 있지만 현장 막장관리가 용이하다는 장점이 있다. 따라서 지보계획에는 이러한 두가지를 활용하여 합리적인 지보설계를 하고자 하였다.

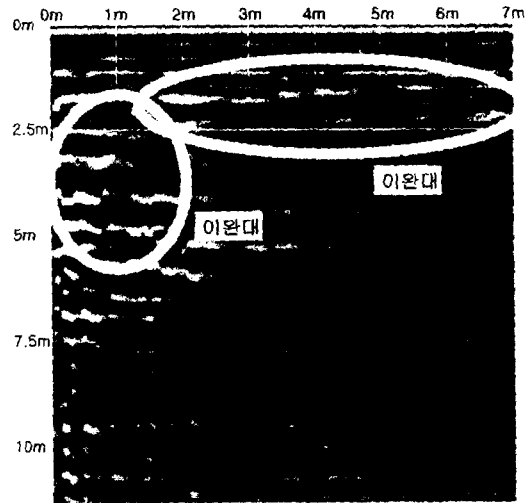


Fig. 6 제2사갱 갱문부 GPR 단면도

5.1 터널지보재 선정

■ 슛크리트

스�크리트는 강섬유보강콘크리트를 선정하였다. 슛크리트 타설방법은 습식공법을 적용하였다. 습식공법은 시공중 분진발생이 적어 시거확보가 용이하고 정밀시공이 가능하며 작업환경 개선으로 공사관리가 원활하다 또한 정확한 개량에 의해 혼합하므로 품질관리가 용이하고, 리바운드량(10-15%)감소로 시공성과 공기, 경제성에서 유리하다

■ 강지보재

강지보재는 설계시 슛크리트 타설시 기존H-형강 지보의 배면 공극문제와 운반, 취급의 용이성 및 슛크리트와의 부착성을 고려하여 격자 지보재(Lattice Girder)를 선정하였다.

■ 록볼트

· 일반구간

- 터널측벽 : 일반 시멘트 그라우팅 록볼트 사용
- 천 장 부 : 록볼트에 브라켓을 장착하여 주입중 록볼트지지

· 취약구간

- 터널막장에서 부분적인 석탄층이 존재하는 경우에 석탄층은 록볼트 공벽의 자립성이 낮으므로 시멘트 그라우팅 록볼트의 신속한 보강이 어렵고 용수가 많은 파쇄대인 경우 일반적인 록볼트로는 신속한 보강효과를 기대하기가 어렵기 때문에 Swellex 록볼트를 적용했다

5.2 지보패턴 (Table 2, Fig 7)

Table 2 표준지보패턴

지보패턴	사 갱						
	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PI-5	PI-6	
RMR	63 이상	50~62	43~49	28~42	27이하	27이하 갱구부, 파쇄대	
Q	13 이상	1.7~13	0.5~1.7	0.05~0.5	0.05이하	0.05이하	
굴착방법	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	
굴진장(m)	4.0	3.5	2.5	1.5	1.2	1.0	
강섬유콘크리트	5cm(일반)	5cm	8cm	12cm	16cm	16cm	
목볼트	길이	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m
	종간격	Random	3.5m	2.5m	1.5m	1.2m	1.0m
	횡간격	Random	2.0m	1.7m	1.3m	1.0m	1.0m
격자지보 간격					1.2m	1.0m	
라이닝 콘크리트	두께	30cm	30cm	30cm	30cm	30cm	
	보강	-	-	-	-	필요시 철근보강	철근보강
보조공법	-	-	-	Fore poling	Fore poling, 강관다단그라우팅	강관다단그라우팅 (프리그라우팅)	

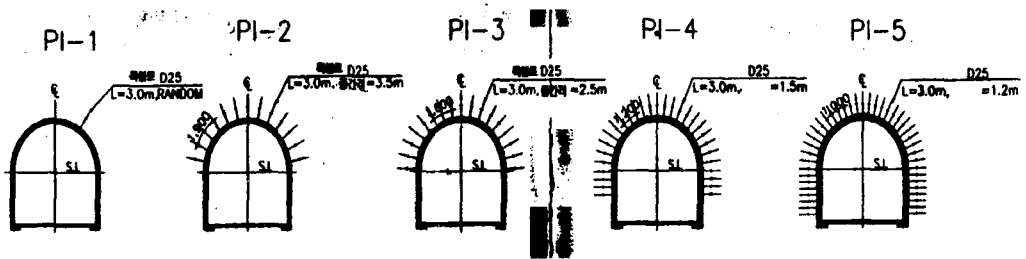


Fig. 7. 지보패턴도

6. 시공

총 연장은 19.576km이며, 곡선반경이 300m이하인 구간은 7.523km, 최고 급배가 30%이상인 구간은 14.091km이다. 이 노선의 특징은 광산 미개발지역인 연화산을 활용하며, 오십천단층 및 석회암 파쇄대를 피하는 노선이다. 또한 보안탄주 대상지역을 피하는 노선이다. 현재 진행은 제 1사갱은 605m (1510m 중)진행된 상태고, 제2사갱은 590m로 굴착이 완료된 상태이다

6.1 공사에로사항

- 본 공사구간은 함탄층, 단층 및 파쇄대, 폐갱 및 공동부분 등 복잡한 지질구조를 가지고 있어 대부분 철저한 지반조사의 결과를 토대로 굴착을 수행해야 하는 어려움이 있다
- 사갱의 전반부는 대체로 맥암과 장성층이 단층으로 접촉하는 부분이거나 또는 이에 인접하는 부분이며, 특히 갱구부에는 2매 내외의 단층이 형성되어 있어 심한 파쇄 및 풍화 상태를 보인다.

Fig. 8은 갱구 상단의 단층대 내에 발달하는 단층 점토를 보인다. 이 외에 맥암류의 남단(탄광폐수 정화장 인근)에도 단층이 형성되어 있으며 이의 영향으로 지표의 노두상에서 단층경면이나 전단된 흔적이 관찰된다.



Fig. 8 제2사갱 갱구부에 발달되는 단층 점토

- 지반상태는 전 공에 걸쳐 심한 파쇄 상태로 서 붕적층의 심도가 깊고 연암층의 경우 TCR 및 RQD가 현저하게 떨어지는 경우가 대부분이다. 또한 단층대의 발달 방향 및 상태에 따라 연암층의 분포 심도 또한 불규칙하다. 연암층 하부에는 보통 풍화 내지 약간 풍화 상태를 보이는 보통암 내지 경암이 분포하며 단층대 내지 파쇄대를 협재한다.

- 터널 굴착심도에는 주로 연암층이 분포하며 연암층은 전체적으로 볼 때 TCR이 3~100%(평균 48%), RQD가 0~77%(평균 8%)로 파쇄가 매우 심한 상태이다.

- RMR 분류에 의하면 부분적으로 III등급(양호)의 암반이 분포하기도 하나 터널 굴착심도 및 상·하부 지반의 대부분은 IV등급(불량)~V등급(매우 불량)에 해당하는 암반으로 분류되므로 이에 적합한 지보패턴이 선정하였다.

Table 3 제 2 사갱 RMR 분류 결과표

구분	범위	평점	등급
터널 천정부	16~54	31	IV
터널 굴착부	17~59	40	IV
터널 하반부	18~53	40	IV
전체	16~59	37	IV

6.2 굴착보조공법

6.2.1 LIM System에 의한 사전지반조사

- 막장 굴착 전 점보드릴로 사전 천공하여 회전속도의 변화 및 굴착시간의 변화로 막장전면의 단층대나 공동확인을 통한 암반의 사전분석을 통해 안전하고 신속한 시공이 이루어 지도록 했다
- 천공시 기록된 시추기록으로 암질을 파악하며 Fig.9, 10은 기록지와 Face mapping 자료이다.

6.2.2 Fore Poling

- 지반내에 철근 또는 강관을 삽입하고 시멘트 몰탈을 충전하는 공법으로, 경사각도 15도 이하, 횡방향간격 30-60cm, 굴진장의 2.5-3배의 길이(4m)를 적용했다. 강파이프, 철근으로 이루어져 있으며 몰탈 주입형식이다
- 본 현장에서는 절리 발달 및 파쇄가 심한 연암, 풍화암 막장의 낙반사고가 우려되는 곳에 시공했다

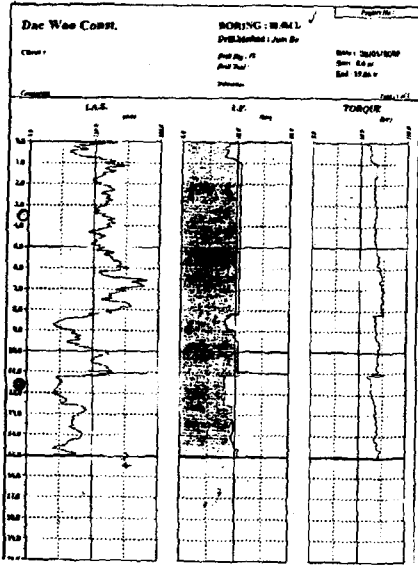


Fig. 9 기록지

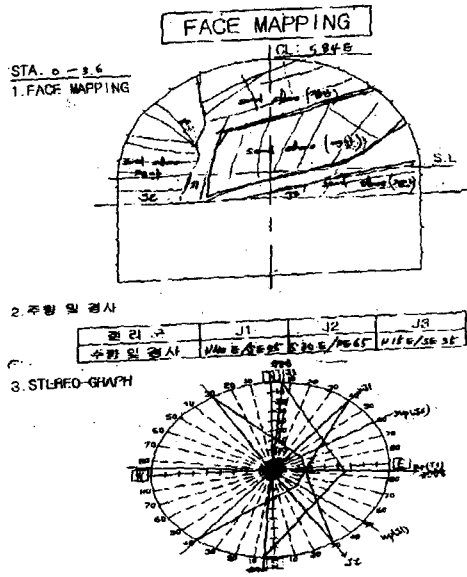


Fig. 10 Face Mapping

6.2.3 경량기포콘크리트 및 강관다단그라우팅

- 갱구분 상단의 공동부분, 단층대, 절리등의 취약부의 봉락에 대비하여 경량기포콘크리트를 시공하였다. 그러나 일부구간은 공동부분의 완전한 충전이 되지 않아 이후 강관다단 그라우팅으로 대체 시공하였다
- 강관다단 그라우팅으로 막장강성 및 강도의 증가, 천단 변위 억제에 효과를 얻을 수 있다

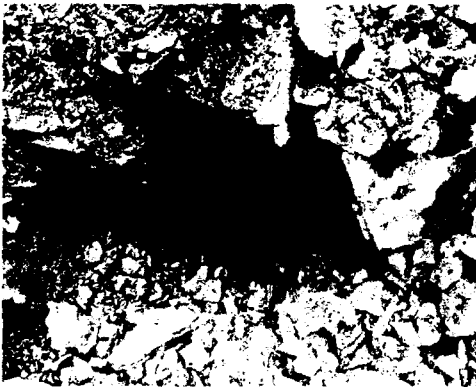


Fig. 11 갱구분 상단 공동부



Fig. 12 강관다단그라우팅 시공

6.2.4 숏크리트 배면 그라우팅

- 터널 내 파쇄대 구간의 차수 및 용수 감소에 의한 막장 안정 향상을 위해 숏크리트 뒷면에 그라우팅으로 충전하였다. (Fig.13)

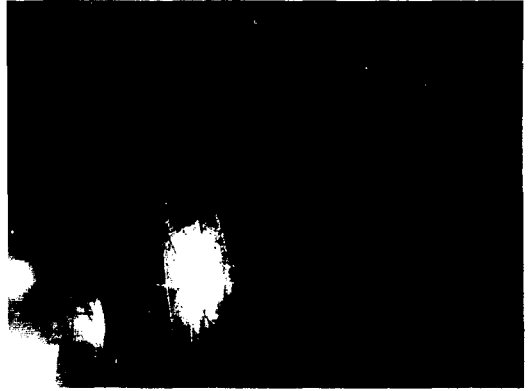


Fig. 13 배면그라우팅 시공

6.2.5 Swellex Rock Bolt

- 일반적인 전면마찰형 록볼트(Swellex)시공은 연약한 암반과 과다 지하수 유입시 록볼트 시공이 곤란할 때 신속한 보강효과를 위해 이용한다.
- 본 현장에서는 불량한 지반에 천공홀이 자립하지 않는 부분(합탄층)에 시공하여 록볼트 자체 홀을 이용하여 몰탈을 삽입 후 팽창시켜, 주변지반의 그라우팅까지 동시에 시공했다. 인발시험결과 '몰탈+팽창'방법과 '팽창' 방법 모두 10ton으로 인발력은 같았다

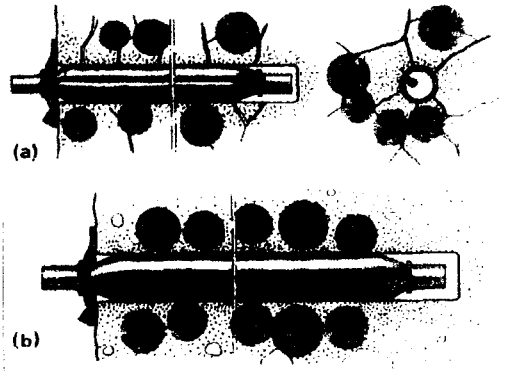


Fig. 14 Swellex 시공원리

· 시험시공순서

- 천공→록볼트삽입→몰탈주입→가압팽창→인발시험

· 시공방법

- 1) 천공(길이:4m,천공면에 직각이 되도록)
- 2) 록볼트 삽입 (소정의 깊이까지 삽입)
- 3) 몰탈충진

- 시멘트는 보통포트랜드 시멘트를 사용한다.
- 모래는 최대직경이 2mm 이하인 입도가 양호한 것을 사용한다.
- 물/시멘트비 40-50, 플로우값 200-220
- 록볼트 정착제 시방배합표 (1m' 기준)

시멘트 (kg)	모래 (kg)	물 (kg)	W/C (%)	플로우값 (mm)	비고
906	906	362	40	215	

- 4) 고압펌프(Pneumatic pump)를 이용한 록볼트 가압팽창을 한다.

5) 인발시험

- 인발시험은 몰탈이 충분히 굳은다음 실시하며, 완전히 인발하여 합탄층에서의 인발내력을 결정한다
- 인발하중의 재하속도는 1ton/분 내외로 한다

6.3 터널굴착전경

본 구간의 터널은 열차운행의 안정성, 피난대피측면, 환기측면, 시공성 측면, 예상운용 측면에서 단선병렬터널의 단면으로 설계되었다. 굴착공법은 전 구간 NATM 공법을 적용하여 막장관찰과 선진보링을 이용하여 복잡한 지질구조 및 지반의 사전예측 및 대응에 신속하도록 하고, 선형유지 및 수정이 용이하도록 하게 하였다.

다음의 사진(Fig. 15~21)들은 현재 시공중인 제 2사갱의 굴착 및 막장 전경을 보여준다



Fig. 15 제2사갱 전경



Fig. 16 가시설 설치

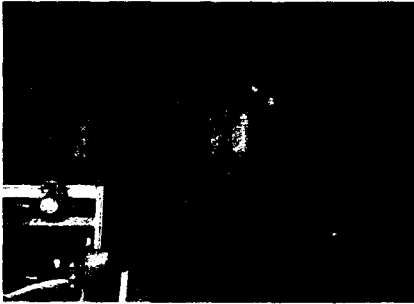


Fig. 17 격자지보설치

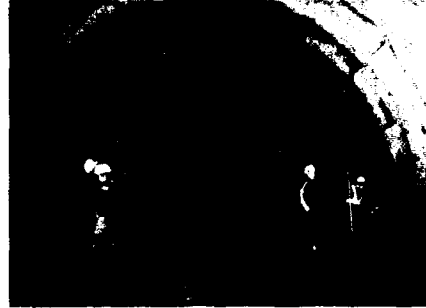


Fig. 18 상부지보



Fig. 19 슛크리트



Fig. 20 횡갱천공

6.4. 계측

· 제 2사갱 터널굴진에 따른 주변지반의 변위특성, 설계 지보패턴의 타당성을 파악하여 지보패턴의 변경, 굴착공법의 변경등과 같이 계측결과를 터널공사에 반영하여 문제점을 최소화하고, 공사의 안정성과 경제성을 확보할 목적으로 각종 정보를 수집하여 Table 4와 같이 계측항목들을 선정, 적재적소에 계측기를 설치하였다



Fig. 21 터널막장

Table 4 계측항목

구분	계측항목	계측장비	계측내용
일상계측 (A계측)	내공변위 측정	광파측정	내공단면의 변위량, 변위속도, 수렴여부 파악 및 주변지반의 안정성, 1차 지보의 타당성, 2차복공의인버트 타설시기 등을 검토
	천단침하 측정	광파측정	내공변위측정과 동일한 목적으로 실시하는 계측항목으로서 굴착에 따른 터널천단의 수직침하량, 침하속도 및 수렴여부 파악
대표단면 계측 (B계측)	지중변위 측정	V/W Rod Extensometer	터널주변의 이관영역범위 및 록볼트 길이의 타당성 등 지반거동 파악
	록볼트축력측정	V/W Rock Bolt Stressmeter	록볼트에 작용하는 축력을 심도별로 측정하여 축응력, 분포상태 파악 및 지보효과 확인
	숏크리트응력 측정	V/W Shotcrete Stressmeter	숏크리트의 배면토압 및 내부응력을 측정
	지표침하측정	광파측정/LEVEL	터널의 안정상태 및 주요 구조물의 경사를 측정하여 해당 구조물의 안정성 여부 판단
영구계측	CON'C 라이닝응력 및 접속부시공이음부 변형측정	유지관리센서	터널 시공후 라이닝 자체의 변형들을 측정하여 해당구조물의 안전도 여부를 영구관리

7. 맺음 말

본 공사구간은 지반 특성상 매우 불량한 지형 및 지질구조를 가지고 있어 굴착 및 지보시공시 많은 어려움이 있다. 따라서 정확한 지반조사와 분석능력을 요하고, 현장시험 및 계측관리 등의 타당성 검토가 중요하다고 하겠다. 특히, 제2사갱의 경우 합탄층의 존재로 더욱 더 터널시공관리에 관심을 갖고 수행하고 있다.

향후 본선터널의 굴착시 막장 전반의 공동 및 단층파쇄대를 확인하기 위하여 가능한 한 많은 방법들(LIM SYSTEM, TSP, HSP등 물리탐사)을 활용하여 굴착 및 지보패턴의 신속한 대응으로 안전한 터널시공이 될 수 있도록 만전을 기할 것이다.