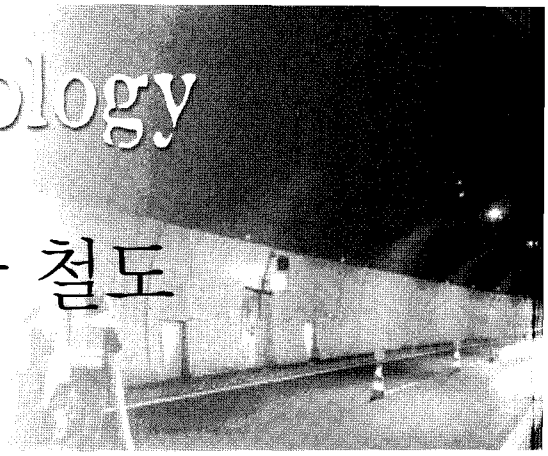


영동선 동백산-도계간 철도 장대터널 건설계획

고동춘 _ 정회원, 철도청 건설본부 토목1팀장

1. 머리말

영동선은 강원도 영주에서 강릉까지 운행되는 철도를 말하며, 영동선 구간중 동백산~도계간 기존 철도는 국내 유일의 스위치백(Switch Back)구간이 있을 정도로 곡선반경 300m 이하의 급곡선구간과 종단구배 30‰이상의 급구배 구간이 노선의 70%를 차지하는 등 불량한 선형을 이루고 있다. 또한, 통리, 고사리 지역의 저심도 민탄개발 갱도에 의한 선로침하와 산골터널의 변상으로 인하여 열차운전 취약개소이다. 따라서 철도청에서는 이러한 문제점을 해소하기 위하여 이설노선을 계획하게 되었으며 Project 수행방식은 턴키Ⅱ공사로 대우컨소시엄이 선정되었다. 이설노선은 험준한 지형조건으로 인하여 불가피하게 16.2km 구간이 단선터널로 계획되었으며, 선로 구배조건을 충족시키기 위하여 터널연장의 절반정도가 루프형 선형으로 계획되었다.

2. 기존노선 현황

최초의 영동선은 1940년에 철암~묵호간 143.5km가 개통되었으며, 이 때 통리~심포리간은 험준한 지형으로 인하여 Incline 방식으로 건설되었다. 당시 전경은 사진 1과 같으며, 오르막길에서는 열차의 무게를 줄이기 위해 승객들이 내려서 도보로 이동했다고 한다. 이후 1993년에 통리~심포리간 8.5km가 개량되어 기존의 Incline이 철거되고 Switch Back 노선이 건설되었다. 사진 2는 Switch Back 구간의 전경을 보여주는 것으로 열차는 전진과 후진을 지그재그로 반복하여 통과하게 된다.

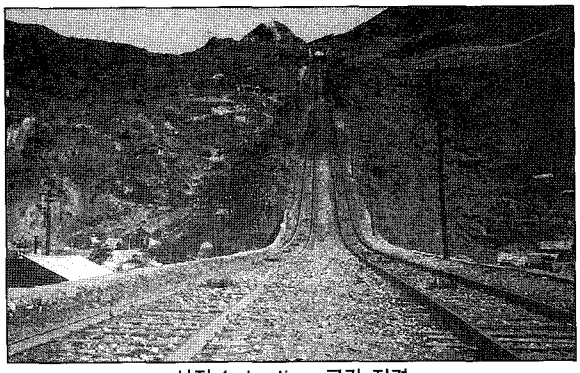


사진 1. Incline 구간 전경

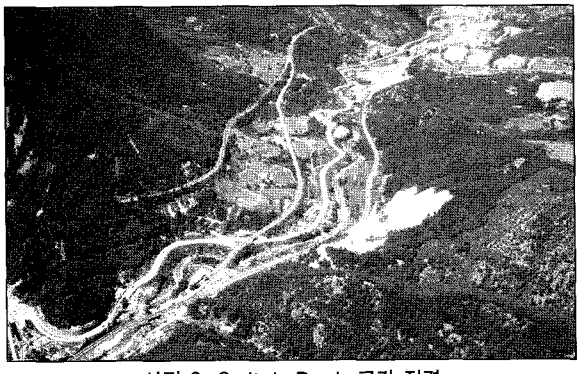


사진 2. Switch Back 구간 전경

기존 동백산~도계간 철도는 총연장 19.6km, 표고차 389.6m, 최급구배 30‰, 최소 곡선반경 300m 이하, Switch Back 구간 2개소(연장 1.5km), 정거장 6개소이다. 본 노선의 특징은 험준한 산악 및 대협곡 지형에 부설되어 상행과 하행 열차속도의 편차가 심하고 전반적으로 선로조건이 불량하다.

3. 터널 건설조건

3.1 철도운행 계획

본 과업구간은 단계적 복선화 계획에 따라 1단계는 단선으로 운행되며, 향후 영동선 잔구간의 복선화 시점에서 2단계 공사가 진행될 계획이다. 따라서, 현 단계에서는 단선 장대터널을 계획하되, 장래 2단계 복선화 공사를 대비한 시공계획을 수립하여야 한다. 단선으로 운행되는 동안, 선로용량을 확보하기 위하여 노선 중간에 교행역을 설치하여 지하터널에서 열차가 교행되도록 하였다. 지하교행역에는 안전측선, 선로보선용 모터카 유치선을 비롯하여 열차운영에 필요한 신호, 통신, 전기 등의 설비가 수용되므로 대단면 터널의 발생이 불가피하다.

지형적인 특성상 선로 시점과 종점간의 고도차(약 400m)를 극복하기 위하여 루프형 터널로 계획되었으며, 장대터널연장을 최소화하기 위하여 설계기준상의 최급구배인 24.5‰를 일방향으로 적용하였다. 선로 곡선반경이 작은 경우, 레일의 편마모에 의한 궤도교체주기가 단축되어 유지관리의 어려움과 비용이 증가하므로 이중 루프나 급곡선 구간을 최소화하였으며, 직선구간의 연장을 최대화하였다.

본 터널구간에는 디젤열차가 운행될 예정이므로 장대터널의 환기와 화재시 승객의 안전한 대피를 위한 방재계획이 고려되어야 한다. 2단계 공사이전에는 열차교행이 불가피하므로 환기조건이 불량하나, 향후 복선화공사에 의한 단선병렬 터널이 건설되면, 환기조건과 터널 운행상의 안전성은 크게 향상된다. 따라서, 과도한 중복투자가 되지 않도록 환기와 방재에 필요한 내부 공간은 2단계 공사시 활용될 수 있도록 계획할 필요가 있다.

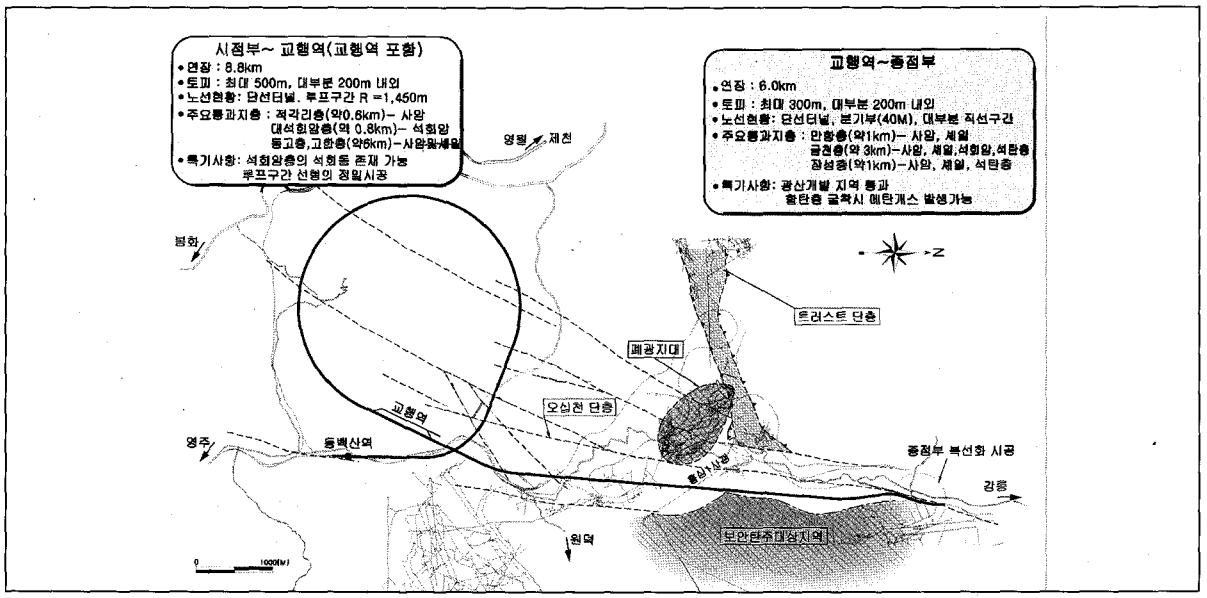


그림 1. 노선평면도 및 주요 단층 및 광산분포.

3.2 지질 및 암반조건

평면선형과 노선 주변의 주요 지질구조대 및 광산분포는 그림 1과 같으며 지질조건은 교행역을 중심으로 명확하게 구별되는 특징이 있다. 동백산역에서 교행역까지의 루프구간은 주로 석회암층과 사암, 셰일 등의 퇴적암층으로 구성되어 비교적 암반조건이 양호하다. 교행역에서 종점부 구간은 광산개발 지층인 금천층, 장성층을 통과하여 사암, 셰일층에 폭 1m 내외의 석탄층이 부분적으로 협재되어 있으며 대체로 본 구간의 암반조건은 다소 불량하다.

본 지역은 광산개발이 매우 활발했던 지역으로 대형업체에 의한 대규모 대심도 광산과 저심도에서 주로 개발이 이루어진 민간광산이 분포하고 있다. 대형업체에 의하여 개발된 폐광지대는 터널 하부에 위치하여 노반침하의 원인이 될 수 있으므로 최대한 우회하였으나, 기존 영동선의 침하 원인인 통리, 심포리 지역의 저심도 민탄 폐갱도는 터널상부에 충분히 이격되어 있어 터널에 영향을 미치지 않으므로 본 구간을 통과하도록 하였다. 보안탄주 지역은 터널통과시 보상비를 지불하여야 하고 장래 채탄 가능성이 있기 때문에 저촉되지 않도록 노선을 계획하였다.

3.3 환경조건

터널은 환경친화성이 높은 토목구조물이나 과업구간의 환경조건을 고려하여 적절한 환경영향 저감대책을 수립할 필요가 있다. 본 과업구간은 낙동강발원지인 황지천과 한강발원지를 비롯하여 상수원 보호구역인 철암천이 위치하고 있으며, 녹지자연도 등급이 높다. 이에 따라, 공사발생수 및 운행중 배출수에 대한 관리가 필요한 것으로 분석되었다.

노선 주변에는 지방도와 과거 광산개발을 위한 산길이 잘 발달되어 있어 이를 잘 활용하면 별도 길내기 공사에 의한 환경파괴를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 시공계획

4.1 굴착공법 선정

국내외 장대터널 건설사례를 조사한 결과, 직경 5m 내외의 수로터널과 같은 소단면 터널은 TBM공법이 적용된 사례가 많으나, 철도나 도로와 같은 대단면 터널은 발파공법이 적용된 사례가 많다. TBM이 적용된 사례를 분석하면, 시종점에서 2대의 쉴드를 적용한 유러터널을 제외한 대부분의 사례에서는 지질조건이 균질한 구간에만 제한적으로 적용되었다. TBM이 선호되는 가장 큰 이유는 지반조건이 양호하고 균질한 경우에 굴진률이 우수하기 때문이다. 그러나, 최근 발파공법도 점보드릴, 숏크리트 타설용 로봇, 자동대차 등의 고성능 작업기계로 측량, 천공, 버력처리, 지보재 시공 등의 Cycle Time이 현저하게 개선되고 있다.

따라서, 적절한 개소의 작업구를 이용하여 막장수를 늘리면 TBM에 준하는 굴진률을 얻을 수 있으며, 작업구는 완공후 장대터널의 환기구, 대피구, 유지관리용 통로로 사용될 수 있는 장점이 있기 때문에 본 터널은 발파공법이 적용되었다.

4.2 주요 시공계획

그림 2는 작업구 및 수직구 위치와 굴착방향을 보여주고 있으며 1번 사갱과 2번 사갱의 연장은 각각 1,510m와 590m이다. 1번 사갱은 연화산의 험준한 지형 때문에 불가피하게 연장이 길어졌으나, 2번 사갱은 계곡부를 이용하여 연장을 최소화 할 수 있었다. 작업구는 버력처리효율을 고려하여 사갱으로 계획하였으며, 종단 구배는 12% 이하로 계획하였고 일정 구간마다 소단을 두어 덤프트럭 운행의 안전성을 도모하였다. 사갱의 평면선형계획은 본선과 직교하도록 접속하여 구조적 안정성을 향상시켰으며, 루프 내측의 2단계 터널 공사시 작업구로 재사용될

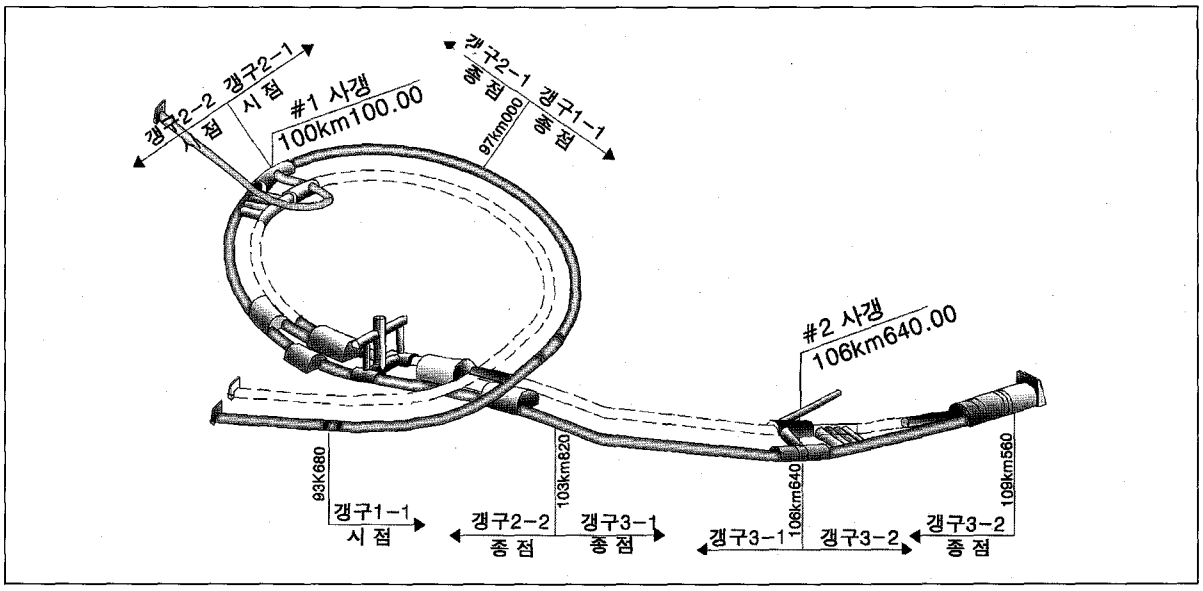
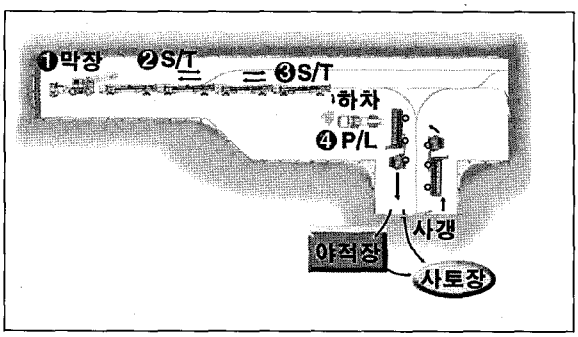


그림 2. 작업구 및 수직구 위치와 시공계획

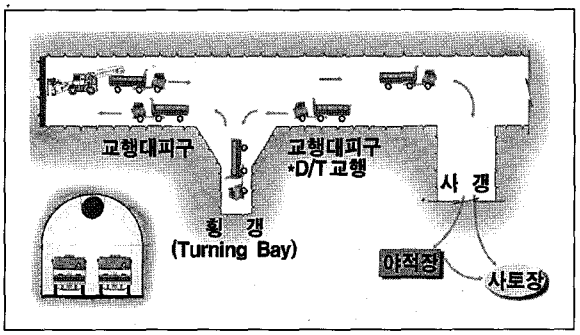
수 있도록 내측 방향에서 접속되도록 하였다. 교행역에 위치한 수직구는 2개의 사갱과 더불어 영구 및 방재시 환기구로 사용된다.

단선 장대터널로 계획된 본 설계 구간은 단면이 작아 버력처리 조건 및 환기조건이 불리하여 주어진 공사기간을 준수하고 공사비를 절감하며 양호한 작업환경을 조성할 수 있도록 터널내 운행 및 성능을 고려한 장비조합을 선정하였다. 본선 버력 처리를 위해 Haggloader와 Suttle Train, Dump Truck을 각각 조합한 2개안을 선정하였으며 구간별 조건에 따라 Turning Bay와 교행 대피구를 설치, 이용하였다(그림 3).

장대터널의 콘크리트 라이닝 시공은 별도의 공기발생 요인이 되므로 공기단축을 위하여 그림 4와 같은 자립식 거푸집(Self-Reacting Tunnel Form)을 적용하였다. 자립식 거푸집은 자체 이동능력이 있어 이동과 거치가 신속하고 재래식 거푸집에 비하여 콘크리트 타설중에도 작업차량이 통과할 수 있는 충분한 공간이 확보되어 굴착과 병행 작업이 가능하다. 이는 시공중 불가피한 사유로 공



(a) Haggloader + Suttle train



(b) Haggloader + Dump truck

그림 3. 갱내버력처리

기지연 요인이 발생할 수 있는 전체 공기의 긴박성을 해소할 수 있는 대안이 될 수 있다.

공사중 환기는 장대터널의 발파공법 적용시 주요 현안 문제로서 송기식, 배기식, 송배기식, 집진기 혼용식을 비교분석하였다. 갱구에서 막장까지의 최대거리가 3.8km 정도에 이르는 특성을 감안하여 환기효율이 좋은 후자의 두 방법을 검토하였으나, 갱구 주변 환경에 영향이 적고 유지관리비가 적은 그림 5와 같은 집진기 혼용식을 적용하였다.

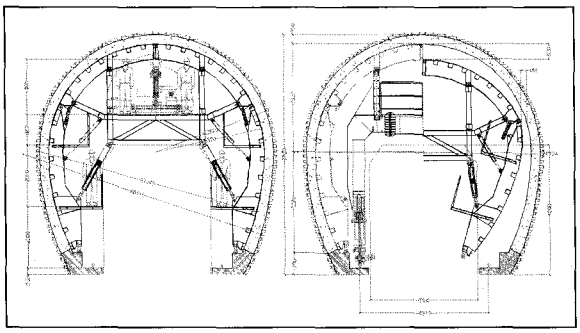


그림 4. 자립식 거푸집

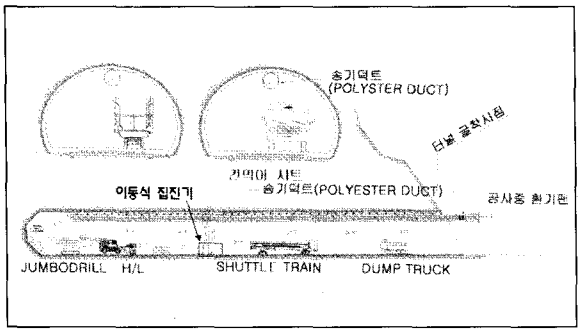


그림 5. 공사중 환기계획도(집진기 혼용식)

5. 터널설계

5.1 터널단면 및 굴착방법

그림 6은 단선, 분기구간 중 가장 큰 확폭단면, 사갱 및 수직구 터널의 표준단면을 보여주고 있다. 단면계획시에는 터널용도에 따른 건축한계 및 소요단면적, 작업공간, 부대시설 공간, 라이닝 두께 등을 고려하였다.

단선터널은 본선 대부분을 차지하는 단면으로써, 건축한계를 만족하며 2인 이상이 동시에 대피할 수 있는 1.5m 폭의 보도를 확보하였으며 보도에는 공동구를 설치하였다. 확폭단면은 교행역 분기부, 환기설비 설치 구간 및 종점부 분기부 일정 구간에 적용되는 단면으로 최대 궤간, 환기설비공간 등을 고려하여 설계하였다. 사갱은 버력처리 차량의 교행이 가능하고 운영시 영구 환기공간을 충분히 확보하도록 하였으며, 환기 수직구는 환기공간과 각종 케이블 설치공간을 확보토록 하였다.

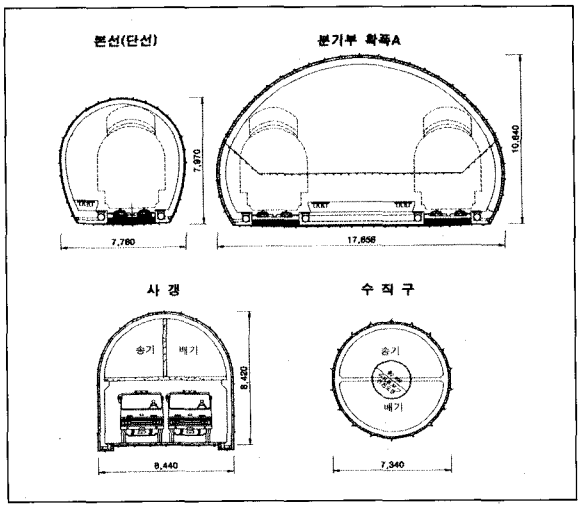


그림 6. 터널단면

지반조건이 불량한 구간에서 안전하게 터널을 굴착하는 방법에는 소단면 분할방식과 보조공법을 이용한 막장보강방식으로 나눌 수 있다. 장대터널의 경우에는 굴진속도를 향상시키기 위한 기계화굴착이 필수적이므로 굴착단면의 일관성을 유지할 필요가 있다. 따라서, 단선터널과 사갱은 단면이 비교적 작기 때문에 굴착단면 유지, 굴착 및 버력처리 장비활용 등을 감안하여 전단면 굴착을 적용하였다.

분기부 확폭터널은 단면적이 크기 때문에 1회 버력처리 용량과 막장 안정성을 검토하여 상하반 분할굴착을 적용하였다. 상하반 분할굴착선은 경계부에서의 응력집중을 방지하고 상반 측벽부 록볼트 시공성을 고려하여 그림 6에서와 같이 측벽부 일부는 하반굴착시 제거하도록 하였다. 터널 발파공법은 굴진장에 따라 적절한 심발공법을 적용하여, 굴진장 2m 이하는 V-cut 방식, 그 이상은 Cylinder-cut 방식을 적용하였다.

환기용 수직구 굴착은 RBM(Raise Boring Machine)과 확대발파를 이용하였다. 즉, 시추공을 유도공으로 이용하여 굴착기를 갱내에서 조립하여 상향으로 선진도갱을 굴착하고 이를 버력처리공으로 이용한 하향 확대발파로 안전하고 신속한 굴착공사를 도모하였다.

5.2 터널지보재

장대터널의 갱내환경과 작업성을 고려하여 숏크리트는 습식 강섬유보강 숏크리트와 격자지보재를 선정하였다. 강섬유보강숏크리트는 철망공종이 불필요하여 갱내 작업공정이 단순하여 작업시간이 단축되고 일반 철망보강형 숏크리트에 비하여 사용량이 적고 반발율이 낮다. 격자지보재는 H형 강지보재에 비하여 가벼워 취급이 용이하고 숏크리트 배면공극이 적고 부수적으로 반발율 감소효과를 기대할 수 있다. 또한, 격자지보재와 강섬유 숏크리트는 함께 조합되어 사용되는 경우에 각각의 장점을 최대화 할 수 있다.

록볼트는 전면접착식 시멘트 몰탈형 록볼트를 적용하였고, 천정부에는 시공성을 향상시키기 위하여 록볼트 정착용 브라켓을 설치하였다. 임시지보재로써 용수가 많은 파쇄대에서는 신속한 지보효과를 기대할 수 있는 Swellex볼트를 적용하도록 하였다.

5.3 터널배수

본 터널은 지형여건상 일방향 구배가 적용되어 적정 통수단면 검토를 위한 지하수량 예측과 장기적 유지관리가 중요한 문제로 대두되었다. 집수정을 설치하기 위해서는 최소 250m 이상의 양정고가 필요하여 에너지 효율 및 유지관리차원에서 불가능하다고 판단되었다.

일차적으로 가장 중요한 문제는 터널 전구간에 대한 유입수량의 정확한 예측이었으나, 계획단계에서는 매우 어렵다. 따라서, 터널심도, 단면형상, 종단구배 등을 고려하여 터널노선을 주요 구간으로 분할하여 유입수량 예측을 수행하였다. 각 심도별 투수계수는 51회의 수압시험 결과를 분석하여 적용하였다. 계산결과, 유입수량은 0.62m^3/min/km이었고 이 수치는 지질조건이 유사한 인근 광업소의 실측수량 0.08m^3/min/km보다 충분한 안전치임이 입증되었다.

그림 7은 장대터널의 배수기능 확보를 위해서 계획한 터널 바닥부 단면을 보여주고 있다. 주요 사항으로는 철도노반의 오탁수와 지하수의 분리배수, 횡배수관의 위치조정, 중앙배수관을 대체한 바닥배수재 적용을 들 수 있다.

터널내부는 화물차에서의 낙탄과 차량에서의 폐유 등으로 정기적인 내부 청소가 필요하며 이때 발생하는 오탁수는 별도 처리되어야 하므로 지하수배수관과 분리배수하도록 하였다. 열차운행에 영향을 주지않으며 터널내부 청소를 하기 위해서 400m마다 설치된 횡갱의 집수구를 이용하여 구간별로 청소하고 발생수는 횡갱에 설치된 집수구에 임시 저장하여 외부로 양수하여 처리토록 하였다.

기존 철도터널은 횡배수관의 위치를 배수관의 상부에 설치하여 우각부 라이닝 두께 부족과 Clogging 현상에 의한 배수관의 막힘현상이 발생하는 경우가 있었다. 이를 해결하기 위하여 본 설계에서는 횡배수관을 배수관 하부에 설치하였다. 즉, 횡배수관이 항상 습윤상태를 유지하여 건조시 침전물이 배수관에 흡착되어 고화되는 현상을 방지하였다.

중앙배수관은 터널 바닥부 배수에 사용되는 매우 일반적인 방식이나 배수로 굴착공사는 번거로운 터널공사중 대표적인 것이다. 그림 8은 바닥배수재를 이용한 세부 상

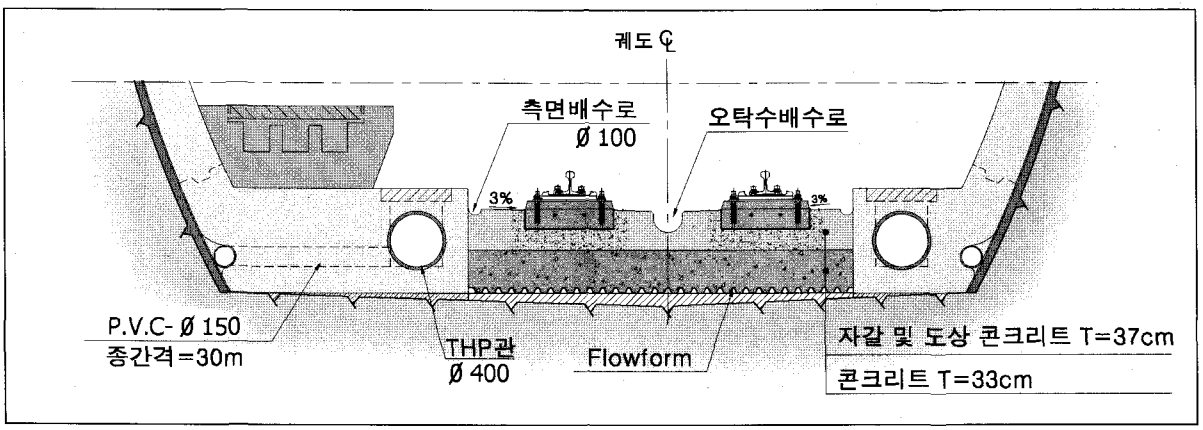


그림 7. 터널 배수단면

세도를 보여주는 것으로 노반하중은 격자안에 충진된 콘크리트가 지지하기 때문에 지지력에는 문제가 없고 설치가 매우 용이하며 통수경로가 바닥전체에 고루 분포하므로 배수신뢰성이 매우 높다.

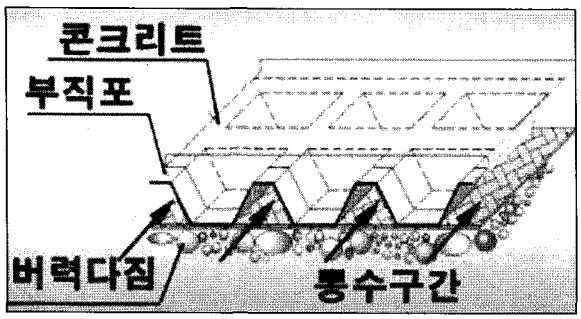


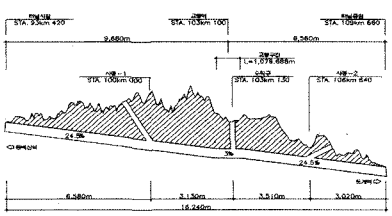
그림 8. 바닥 배수 상세

6. 환기방재 설계

6.1 설계조건

환기방재 측면에서 영동선 장대터널은 세계적으로도 그 사례를 찾기 어렵다. 연장측면만 보면, 알프스 산맥을 통과하는 로취버그터널(약 30km)이나 고타드터널(57km)에 비하여 짧지만, 철도운영조건에 의하여 해외사례와 큰 차이가 있다. 첫째는 단계적 건설계획으로 인하여 2단계 복선화 이전에는 1개소의 교행구간을 제외하면 단일터널내에서 열차가 양방향으로 운행되고, 둘째는 매연을 발생하는 디젤기관차가 운행된다는 것이다. 이것은 터널연장에 비하여 큰 환기소요량이 요구되는 원인이 된다. 환기설계조건 및 개요는 〈표 1〉과 같다.

표 1. 환기설계 조건

구 분	구 간		
	터널시점~교행역	교행역구간	교행역~터널종점
종단면도			
연 장(m)	9140.156	1079.688	6020.156
내공단면적(㎡)	40	53(승강장)	40
대표직경(m)	6.606	7.548	6.606
종단구배(‰)	24.5	3.0	24.5
시종점고저차(m)	370		
열차운행대수	· 첨두시:상행:38대 하행:37대	· 평상시:상행:35대 하행:34대	
디젤기관차 운행대수	· 첨두시:상행:11대 하행:10대	· 평상시:상행:10대 하행:9대	

6.2 환기방식

열차운행 단계에서의 터널내 환기는 정상시와 비상시(화재시)로 구분된다. 정상시에는 디젤기관차에 의한 오염물질의 터널내 축적을 방지하기 위하여 운행간격 시간내에 완전한 공기의 교체가 필요하고 화재시에는 승객의 안전확보와 구난열차의 진입이 가능하도록 연기역류의 제어를 필요로 한다. 따라서, 본 터널내의 모든 환기구간에서 열차화재 발생시 승객이 대피하는 방향으로 연기의 역류현상(back-layering)이 발생되지 않도록 하기 위한 제연풍속 2m/s이상의 풍속유지와 정상시 치환환기 목적을 만족하는 환기구 3개(사갱 1, 2, 수직갱)로 구성된 급·배기 환기방식을 채택하였다. 그림 9는 기본적인 환기시스템 및 터널내 기류방향을 보여주고 있다.

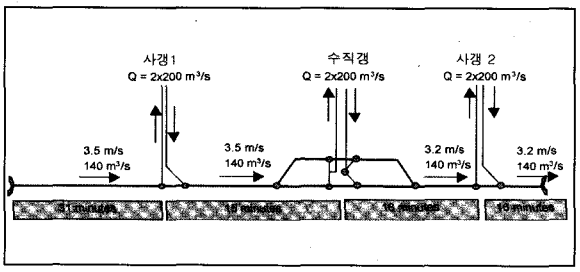


그림 9. 환기시스템

6.3 구난/대피계획 및 방재설비

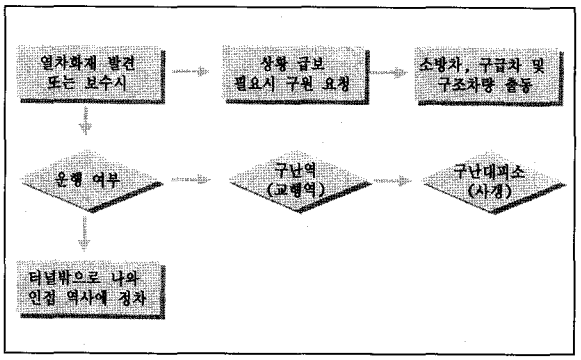
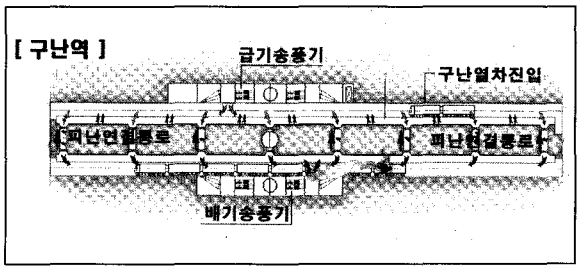


그림 10. 구난 및 대피 시나리오

구난/대피계획은 기존의 철도사고 사례를 분석하여 다양한 비상시나리오를 설정하였으며, 개략적인 대피개념은 그림 10과 같다.

터널내 정차시 주 대피공간은 교행역에 있는 구난역이고 불가피하게 구난역까지 운전이 불가능한 경우에는 2개소의 사갱접속부에 설치된 구난대피소로 대피한다. 구난역에서는 화재진압설비를 비롯하여 각종 방재설비가 집결되어 있으며, 화재시 승객이 대피하기에 충분한 3m의 보도폭을 확보하였다. 화재시 구난역에서의 대피동선은 그림 11과 같이 승객은 옆 터널로 대피하고 반대터널에서는 급기를 화재가 난 터널에서는 배기를 하여 연기의 터널내 확산을 방지하도록 하였다. 대피통로에는 2중의 방화문이 설치되었으며 대피한 승객은 안전한 상태에서 구난열차를 통하여 터널밖으로 탈출한다. 구난대피소에서는 승객은 배연방향과 반대로 대피하며 사갱을 통하여 구난차량이나 도보로 탈출하게 된다.



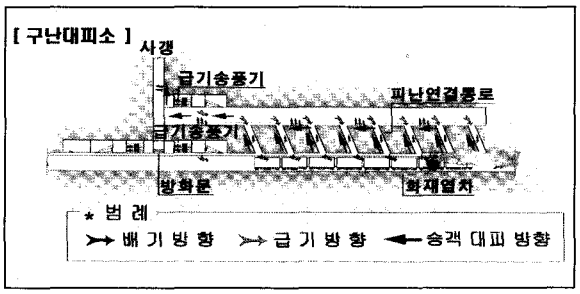


그림 11. 구난역 및 구난대피소 대피계획

방재설비에는 소화설비, 경보설비, 피난설비, 소화활동설비, 기타 설비로 구분 할 수 있으며 일반 터널구간과 교행역에 설치된 성비들은 표 2와 같다.

표 2. 터널내 방재설비

구 분	터 널	교행역
소화 설비	소화기구	소화기구, 옥내소화전 설비, 포소화 설비
경보 설비	자동화재 탐지설비	자동화재 탐지 설비, 비상경보 설비, 비상방송 설비
피난 설비	피난유도 설비, 비상조명 설비, 인명구조 기구	피난유도 설비, 비상조명 설비, 인명구조 설비
소화활동 설비	제연설비, 무선통신 설비, 연소방지 설비	제연설비, 비상콘센트 설비, 무선통신 설비, 연소방지 설비
기타 설비	소화용수 급수 설비(방수구), 라디오 재방송 설비,CCTV설비, 비상전화 설비, 대피통로, 피난 연결통로, 구난 보급소, 구난대피소,가스탐지기, VI 감지기, CO 감지기, NO감지기, 풍향풍속계, 온 · 습도계	비상전원설비(UPS),라디오 재방송 설비, CCTV 설비, 비상전화 설비, 대피통로, 피난 연결통로, 구난보급소, 구난역

7. 장대터널 궤도설계

본 영동선 장대터널은 유지관리가 용이하고 안정성이 높은 콘크리트 도상을 적용하였으며, 국내외에서 적용된 Delkor, L.V.T, KNR 등의 형식을 비교 검토하여 그림 12와 같은 Delkor 개량형을 선정하였다. 즉, 기존의 Delkor 형식에서 방진체결장치 고정블록을 설치하고 고정부 나사스파이크를 볼트로 개선하였다. 고정블록은 시공정밀도 향상, 선로 횡단케이블 설치 용이성을 도모할 수 있으며, 볼트는 나사스파이크에 비하여 체결구 교완이 매우 용이하다. 단, 온도변화가 심한 갱구부 일부 구간은 자갈도상을 적용하였다.

체결구는 장대레일의 복진에 충분한 저항력을 갖을 수 있도록 충분한 탄성이 있어야 한다. 이에 영국에서 개발된 PANDROL형식과 독일에서 개발된 VOSSLOH 형식

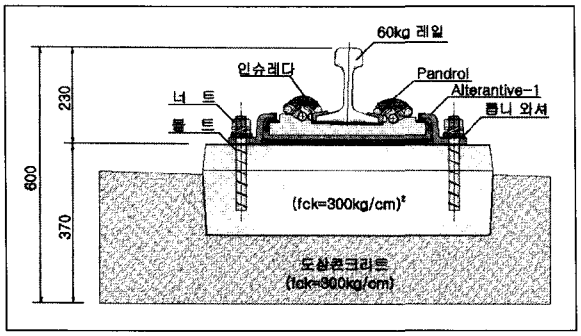


그림 12. Delkor 개량형 궤도구조

을 비교검토하여 부품수가 적어 체결과 해체가 용이한 PANDROL형식을 적용하였다.

레일길이가 200m 이상인 장대레일은 승차감이 좋고 복진저항력이 우수하며 보수량이 적은 장점이 있다. 영동선 장대터널은 곡선반경이 완만하고 내부 온도변화가 적기 때문에 기본적으로 장대레일 설치조건에 적합하며, 궤도안전성과 유지관리측면을 고려하여 일부 갱구부와 교행역 분기구간을 제외한 전 터널구간에 장대레일을 적용하였다.

8. 맺음말

영동선 동백산-도계간 장대터널은 국내 최장대 철도터널로써 철도와 터널분야의 설계 및 시공기술의 발전에 크게 이바지할 것으로 기대된다. 또한 국토의 대부분이 산악지형임을 감안하면, 앞으로 철도나 도로 시설을 위한 장대터널의 건설은 증가할 것으로 예상되며, 영동선 장대터널은 향후 장대터널의 계획에 시금석이 될 것이다.

이러한 점을 고려하여 본 현장에는 홍보관을 운영하여 공사현황 및 사업에 대한 국내외 홍보기능, 기술축적과 자료교류 장소제공, 공사진행 및 내용에 대한 관리 및 교육 기능 등을 수행할 계획이며, 우리청에서는 터널에서의 환기 및 방재기준을 철도의 특성에 맞도록 재정비할 계획이다.