

## 장대 터널의 계획과 설계

## Construction Planning and Design of a Long Tunnel

장석부<sup>1)</sup>, Seok-Bue Chang, 윤영훈<sup>2)</sup>, Young-Hoon Yoon, 김용일<sup>3)</sup>, Yong-Il Kim, 김진한<sup>3)</sup>, Jin-Han Kim

<sup>1)</sup> (주)유신코퍼레이션 터널부 차장, Deputy General Manager, Yooshin Engineering Co.,

<sup>2)</sup> (주)대우 토목기술1팀 차장, Deputy General Manager, Daewoo Co.,

<sup>3)</sup> (주)대우 토목기술1팀 과장, Manager, Daewoo Co.,

**SYNOPSIS :** This paper presents the construction planning and the detail design of a 16.2 km long railroad tunnel in a mountainous area. Major design conditions for railroad are the single track, loop-typed alinement, and a maximum grade of 24.5%. A underground station(double track) with a length of 1.1km is located in the middle of the line for train cross-passing. Tunnel is excavated in highly complex geological conditions including faulted areas, abandoned mine works areas, and various rock types such as sandstone, shale, limestone, and coal seam partly. Drilling and blasting method was adopted because it is more flexible than TBM(Tunnel Boring Machine) as a result of risk assessment for geological conditions in this area. Two working adits were planned to adjust the construction schedule and can be used for ventilation and maintenance in operation phase. New material and concept were introduced to the tunnel drain design. They are expected to improve tunnel drain condition and capability. Rational tunnel support design was tried to consider the various tunnel size and purpose and to use the geological investigation results.

**Key words :** long tunnel, tunnel planning, tunnel design, railroad tunnel

### 1. 서 론

영동선 동백산~도계간 기존 선로는 국내 유일의 스위치백(switch-back)구간이 있을 정도로 곡선반경 300m 이하의 급곡선구간과 종단구배 30%이상의 급구배 구간이 노선의 70%를 차지하고 있어 열차운행지연 요인이 되고 있다. 또한, 통리, 고사리 지역의 저심도 민탄개발 쟁도에 의한 선로침하와 산골터널의 변상은 본 구간의 안전한 선로확보에 장애요인이 되고 있다(영주지방철도청, 1997). 이러한 문제점을 해소하기 위하여 연장 17.8km의 이설노선이 계획되었으며, 협준한 지형조건으로 인하여 불가피하게 16.2km 구간이 단일터널로 계획되었다. 또한, 선로 구배조건을 충족시키기 위하여 터널연장의 절반정도가 루프형 선형으로 계획되었다.

과업지역의 지질을 대분하면, 조선누층군, 평안누층군, 경상누층군 및 층적층으로 구성된다. 각 지층은 과업구역내 발달한 충상단층(thrust)에 의해 수 차례 반복되며 오십천 단층 등의 주향이동 단층에 의해 단절되어 매우 복잡한 지질구조를 보인다. 평안누층군의 장성층, 금천층과 함탄층의 반복적 분포로 주가행탄층이 복잡한 분포를 보인다.

장대터널은 개구에서 막장까지의 거리가 멀어 작업원의 접근, 공사중 환기, 배수 조건이 불량하고 장기 공사가 불가피하다. 특히, 본 과업구간과 같이 지질조건이 불량한 경우에는 각종 위험요인에 의하여

공사지연 및 인명과 재산상 피해 등이 발생할 가능성이 크다. 또한, 철도 시설물로 써의 장대터널은 내부 환기, 열차교행, 유지관리, 비상시 접근 등이 어려운 특성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 철도 및 각종 설비 관련 요구조건을 만족하며, 복잡한 지층 및 단층대와 광산개발지역을 통과하는 장대터널의 시공계획과 설계 사례를 수록하였다.

## 2. 터널건설 조건

### 2.1 철도운행조건

본 과업구간은 단계적 복선화 계획에 따라 1단계는 단선으로 운행되며, 향후 영동선 전구간의 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 안전 측선, 선로보선용 모터카 유치선을 비롯하여 열차운영에 필요한 신호, 통신, 전기 등의 설비가 수용되므로 대단면 터널의 발생이 불가피하다.

선로 시점과 종점간의 고도차를 극복하기 위하여 루프형 터널로 계획하였으며, 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 금곡선 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.

### 2.2 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, 세일 등의 퇴적암층으로 구성되어 비교적 암반조건이 양호하다. 교행역에서 종점부 구간은 광산개발 지층인 금천층, 장성층을 통과하여 사암, 세일층에 폭 1m 내외의 석탄층이 부분적으로 협재되어 있으며 대체로 본 구간의 암반조건은 다소 불량하다.

과업구간에는 남북축과 동서축을 중심으로 단층이 발달하고 있어 단층을 완벽하게 피한 노선을 선정하기는 불가능하나 주요 단층을 우회 또는 통과를 최소화하도록 하였다. 특히, 산골터널지역은 트러스트 단층에 의하여 터널라이닝의 변상이 발생하여 2차의 보강공사가 이루어진 바 있으므로 최대한 우회하도록 계획하였다. 본 구간의 트러스트의 존재는 산골터널 준공도서와 지표지질조사결과로부터 파쇄대 폭이 20m 이상임이 확인되었으며 3매의 충상단층이 반복되어 있다. 오십천 단층은 남북방향의 주향이동 단층으로서 과업종점인 도계역이 그 연장선 상에 위치하고 있다. 선형조건상 오십천 단층을 우회하기가 불가능하여 시점측 일부 구간에서만 직교로 통과하도록 하였고 충분한 이격거리를 확보하도록 계획하였다.

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 우회하였다. 기존 영동선의 침하 원인인 통리, 심포리 지역의 저심도 민탄 폐광도는 터널상부에 충분히 이격되어 있어 터널에 영향을 미치지 않으므로 본 구간을 통과하도록 하였다. 보안탄주 지역은 터널통과시 보상비를 지불하여야 하고 장래 채탄가능성이

있기 때문에 저촉되지 않도록 노선을 계획하였다.

탄총구간은 굴착중 메탄가스가 발생하거나, 부분적 석탄층의 함몰 등이 발생할 가능성이 있기 때문에 이에 대한 대책이 수립되어야 한다. 석회암 통과구간에는 공동이 터널주변에 있을 가능성이 있으나, 설계단계에서 광범위한 구간에 대한 공동탐사 및 대처가 어려우므로 시공중 공동조사 및 대책방안이 요구된다.

암반파열(rock bursting), swelling, squeezing과 같은 암반이상 거동의 발생가능성은 평균심도가 200m 내외에 불과하고, 암석성분 조사결과 무수석고나 철과 같이 지하수에 의하여 팽창하는 성분이 없는 점을 고려하면 낮을 것으로 판단된다(Sinha, 1989). 또한, 대부분의 단층폭이 작고 점토협재물을 포함한 단층을 통과하는 구간이 거의 없어 단층통과구간에서도 암반 이상 거동의 가능성은 낮을 것으로 판단되나, 시공시 조사결과를 분석하여 적절한 대책이 필요할 수도 있을 것이다.

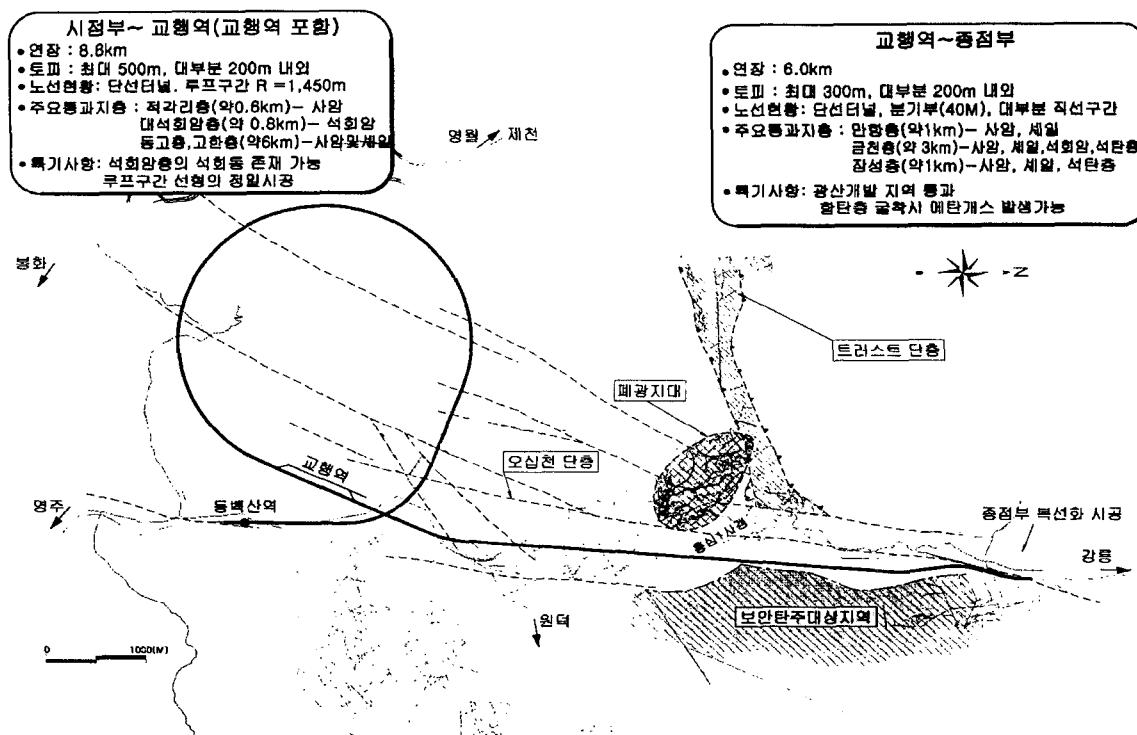


그림 1. 노선평면도 및 주요 단층 및 광산분포.

### 3. 굴착공법 및 시공계획

#### 3.1 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 쉘드를 적용한 유러터널을 제외한 대부분의 사례에서는 지질조건이 균질한 구간에만 제한적으로 적용되었다. TBM이 선호되는 가장 큰 이유는 지반조건이 양호하고 균질한 경우에 굴진율이 우수하기 때문이다. 그러나, 최근 발파공법도 점보드릴, 솗크리트 타설용 로봇, 자동대차 등의 고성능 작업기계로 측량, 천공, 벼력처리, 지보재 시공 등의 cycle time이 현저하게 개선되고 있다. 따라서, 적절한 개소의 작업구를 이용하여 막장수를 늘리면 TBM에 준하는 굴진율을 얻을 수 있으며, 작업구는 완공후 장대터널의 환기구, 대피구, 유지관리용 통로로 사용될 수 있는 장점이 있다.

TBM 선진도갱과 확공발파공법은 죽령터널에 적용된 바와 같이 조기 터널관통과 선진지반조건 분석과 같은 많은 장점이 있다. 그러나, 본 과업구간에서는 2가지 측면에서 불리한 점이 분석되어 적용대상 공법에서 배제하였다. 즉, 단면이 도로터널이나 복선단면에 비하여 작은 단선타널로써 확대발파효과가 적고 TBM 선진도갱에 의한 터널관통후 후속 발파공정이 시작되기 때문에 공사기간이 연장되는 문제점이 있었다.

과업구간의 지질조건 분석결과 위험요인을 내포하고 있는 구간은 일부 광산개발지층, 석회암층, 단층 통과구간을 들 수 있다. 광산개발지층에서는 폐갱, 굴착중 개스, 부분적 석탄층의 함몰 가능성성이 있으며, 석회암지대에서는 터널 주변에 공동이 존재할 가능성이 있고 단층지대에서는 피압수나 과다유입수와 같은 지하수 문제와 막장 봉락의 가능성이 있다. 폐갱이나 석회동과 같은 공동은 그 자체가 터널의 구조적 안정성을 저해시키는 요인이 되지만, 공동에 차 있는 지하수의 용출이 큰 문제가 될 수도 있다.

이와 같은 위험요인은 막장이 도달하기 전에 감지하여 적절한 대책을 세우는 것이 바람직하나, 굴착 중 이러한 위험상황에 직면하는 경우 신속한 대응이 가능하도록 계획하여야 한다. 선진보링과 물리탐사의 과다한 적용은 공기지연과 비용증가의 원인이 될 수 있으며 이러한 쟁내조사로도 위험요인을 완벽하게 감지하기는 어렵기 때문이다.

발파공법은 막장 관찰과 접근이 용이하고 굴착이 비연속적으로 이루어지기 때문에 지반조건의 가변성에 대응성이 우수하다. 반면에, TBM은 막장접근이 어려워 막장에서의 선진조사나 대처를 위한 작업이 곤란하고 막장함몰 발생시 복구하기가 상당히 어렵다.

이러한 특성들을 감안하여 위험도분석(risk assessment)을 수행한 결과의 요약은 표 1과 같으며, 발파공법이 TBM에 비하여 대부분의 위험요인 감지와 대처에 우수한 것으로 입증되었다. 단, 석탄층의 개스는 화약과 뇌관을 사용하는 발파공법 특성상 TBM이 다소 안전한 경향이 있으나, 방폭(flameproof)처리 전자설비 사용을 전제로 한다. 이 문제도 발파전에 개스농도를 측정하고 적절한 환기를 수행한다면 큰 문제가 되지 않을 것으로 예상된다.

표 1. 과업구간의 위험지대에 대한 발파공법과 TBM의 적용성 비교요약

위험요인	위험도		유리한 공법
	TBM	NATM	
지하수 유입	높음	보통	-
가연성 가스유입	낮음	보통	TBM
봉락지반	높음	보통	NATM
동공 << 터널직경	낮음	낮음	-
동공 ≈ 터널직경	보통	낮음	NATM
동공 >> 터널직경	높음	보통	NATM
막장의 가변조건	보통	낮음	NATM
터널노선에 따른 함몰	높음	보통	NATM

### 3.2 주요 시공계획

과도한 작업구 연장과 수는 쟁구공사 및 사토량으로 인한 환경훼손과 공사비 증가의 원인이 된다. 이에 72개월의 지정공기를 준수할 수 있는 최소한의 작업구 수를 분석한 결과, 2개가 필요한 것으로 분석되었다. 또한, 디젤열차의 운행조건에 따른 환기요구량을 분석한 결과, 3개의 환기구가 필요한 것으로 분석되었다. 작업구는 공사 완료후 운행중 환기구로 사용될 수 있으므로 먼저, 작업구 계획을 수립한 후 환기구 계획을 수립하였다.

그림 2는 작업구 및 수직구 위치와 굴착방향을 보여주고 있으며 1번 사방과 2번 사방의 연장은 각각 1,510m와 590m이다. 1번 사방은 연화산의 험준한 지형 때문에 불가피하게 연장이 길어졌으나, 2번 사방은 계곡부를 이용하여 연장을 최소화 할 수 있었다. 작업구는 버력처리효율을 고려하여 사방으로 계획하였으며, 최대 구배는 12%이하로 계획하였고 일정 구간마다 소단을 두어 덤프트럭 운행의 안전성을 도모하였다. 사방의 평면선형계획은 본선과 직교하도록 접속하여 접속부의 구조적 안정성을 향상시켰으며, 루프 내측의 2단계 터널 공사시 작업구로 재사용될 수 있도록 내측 방향에서 접속되도록 하였다. 교행역에 위치한 수직구는 2개의 사방과 더불어 영구 및 방재시 환기구로 사용된다.

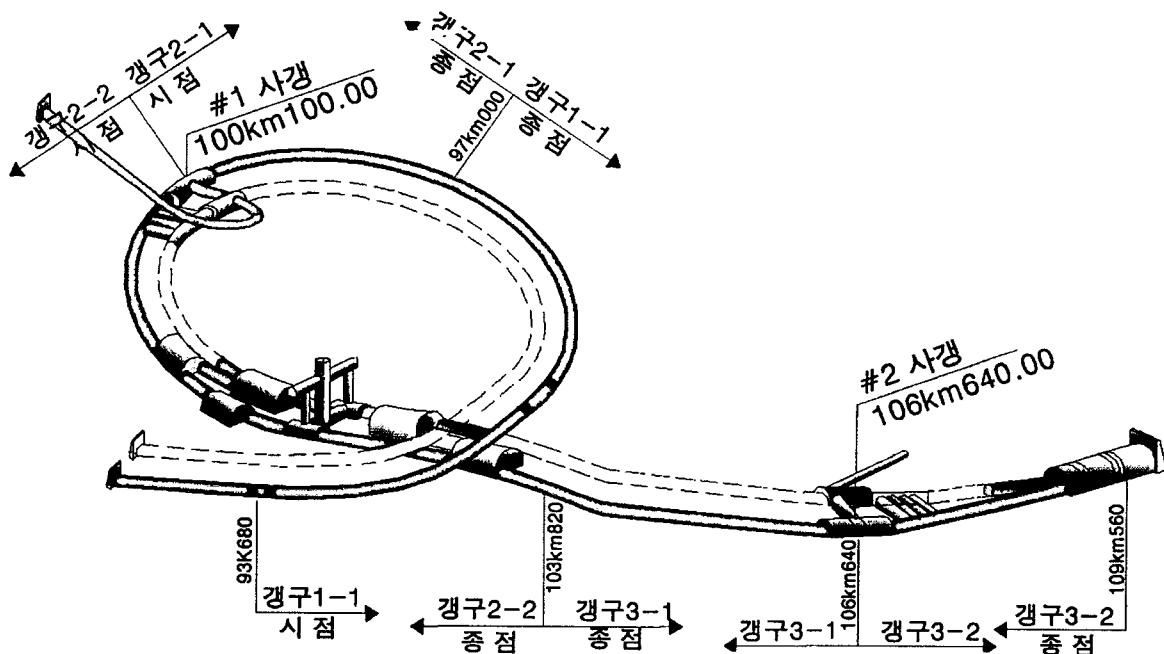


그림 2. 작업구 및 수직구 위치와 시공계획.

장대터널의 콘크리트 라이닝 시공은 별도의 공기발생 요인이 되므로 공기단축을 위하여 그림 3과 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 공기지연 요인이 발생할 수 있는 전체 공기의 긴박성을 해소할 수 있는 대안이 될 수 있다.

공사중 환기는 장대터널의 발파공법 적용시 주요 현안문제로서 송기식, 배기식, 송배기식, 집진기 혼용식을 비교분석하였다. 쟁구에서 막장까지의 최대거리가 3.8km 정도에 이르는 특성을 감안하여 환기 효율이 좋은 후자의 두 방법을 검토하였으나, 쟁구 주변 환경에 영향이 적고 유지관리비가 적은 집진기 혼용식을 적용하였다.

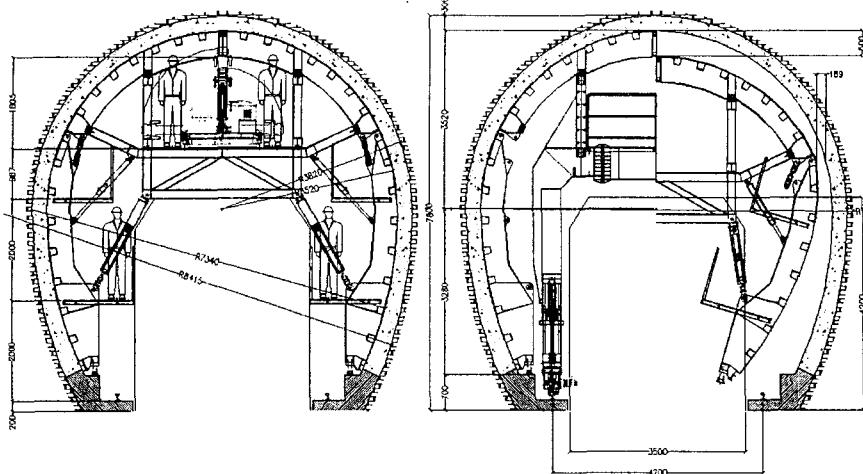


그림 3. 자립식 거푸집.

#### 4. 터널설계

## 4.1 터널단면

그림 4는 단선, 분기구간 중 가장 큰 확폭단면, 사생 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, 환기 설비 설치 구간 및 종점부 분기부 일정 구간에 적용되는 단면으로 최대 궤간, 환기설비공간 등을 고려하여 설계하였다. 사방은 벼력처리 차량의 교행이 가능하고 운영시 영구 환기공간을 충분히 확보하도록 하였으며, 환기 수직구는 환기공간과 각종 케이블 설치공간을 확보토록 하였다.

#### 4.2 터널굴착

지반조건이 불량한 구간에서 안전하게 터널을 굴착하는 방법에는 소단면 분할방식과 보조공법을 이용한 막장 보강방식으로 나눌수 있다. 장대터널의 경우에는 굴진속도를 향상시키기 위한 기계화굴착이 필수적이므로 굴착단면의 일관성을 유지할 필요가 있다. 따라서, 단선텁과 사개은 단면이 비교적 작기 때문에 굴착단면 유지, 굴착 및 벼력처리 장비활용 등을 감안하여 전단면 굴착을 적용하였다.

대단면 분기부 터널은 단면적이 크기 때문에 1회 벼력처리용량과 막장 안정성을 검토하여 상하반 분할굴착을 적용하였다. 상하반 분할굴착선은 경계부에서의 응력집중을 방지하고 상반 측벽부 록볼트 시공성을 고려하여 그림 4에서와 같이 측벽부 일부를 하반굴착시 제거하도록 하였다. 이는 상반굴착량을 감소시켜주고 공사중 배수에 의한 측벽 기초 지지부의 열화방지 등의 부수적 기대효과도 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

환기용 수직구 굴착은 RBM(Raise Boring Method)과 확대발파를 이용하였다. 즉, 시추공을 유도공으로 이용하여 굴착기를 쟁내에서 조립하여 상향으로 선진도갱을 굴착하고 이를 벼력처리공으로 이용한 하향 확대발파로 안전하고 신속한 굴착공사를 계획하였다.

1회 굴진장은 Q시스템에 의한 최대무지보폭을 이용하여 결정하였다(Bieniawski, 1989). 발파공법은 굴진장에 따라 적절한 심발공법을 적용하여, 굴진장 2m 이하는 V-cut 방식, 그 이상은 Cylinder-cut 방식을 적용하였다.

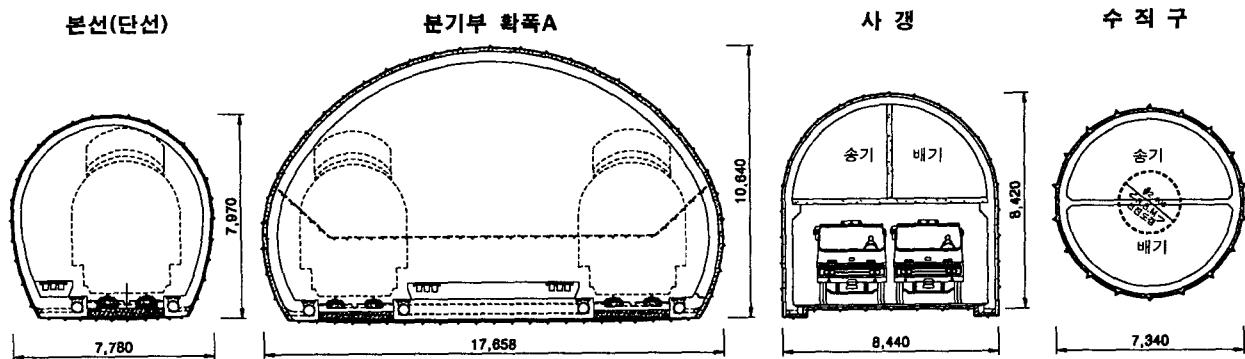


그림 4. 터널단면

### 4.3 터널지보

장대터널의 쟁내환경과 작업성을 고려하여 솗크리트는 습식 강섬유보강 솗크리트와 격자지보재를 선정하였다. 강섬유보강 솗크리트는 철망공종이 불필요하여 쟁내 작업공정이 단순하여 작업시간이 단축되고 일반 철망보강형 솗크리트에 비하여 사용량이 적고 반발율이 낮다. 격자지보재는 H형 강지보재에 비하여 가벼워 취급이 용이하고 솗크리트 배면공극이 적고 부수적으로 반발율 감소효과를 기대할 수 있다. 또한, 격자지보재와 강섬유 솗크리트는 함께 조합되어 사용되는 경우에 각각의 장점을 최대화 할 수 있다.

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

터널지보설계는 Q-시스템 지보차트(Grimstad & Barton, 1993)를 이용하여 그림 5와 같이 각 터널의 단면규모와 용도에 적합한 지보범주를 설정하여 표준지보패턴을 설계하였다. 터널유효폭은 터널폭이나 높이중 큰 값을 터널용도에 따른 중요도를 의미하는 ESR(Excavation Support Ratio)로 나눈 수치이다.

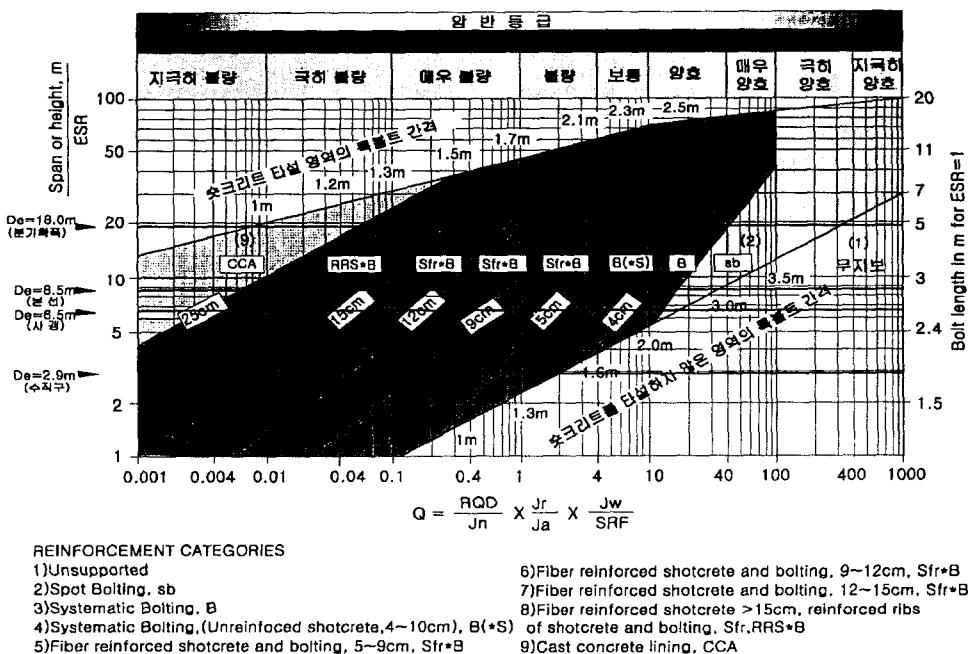


그림 5. Q-시스템에 의한 각 터널단면 및 용도를 고려한 지보설계

Q-시스템은 상세한 터널지보설계 기준을 제시하고 있으나, 암반평가 방식이 복잡하고 국내 막장관찰 및 암반평가가 RMR을 위주로 이루어지는 현실을 감안할 필요가 있었다. 이에, Q-시스템에 의하여 설계된 표준지보패턴의 현장 적용시 RMR을 적용할 수 있도록 지반조사결과에 의한 Q-RMR상관식을 도출하여 시공시 RMR에 의한 막장조사결과에 따라 해당 지보패턴을 직접 적용할 수 있도록 하였다.

#### 4.4 터널배수

본 장대터널은 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 Goodman식에 의한 유입수량 예측을 수행하였다. 각 심도별 투수계수는 51회의 수암시험 결과를 분석하여 적용하였다. 계산결과, 유입수량은  $0.62\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이었고 이 수치는 지질조건이 유사한 인근 광업소의 실측수량  $0.08\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 보다 충분한 안전치임이 입증되었다. Goodman식에 의한 유입수량 예측은 대표단면에 대한 수치해석에 의한 침투수 해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

그림 6은 장대터널의 배수기능 확보를 위해서 계획한 터널 바닥부 단면을 보여주고 있다. 일반 철도 터널에 비하여 특징은 1) 궤도면 배수와 지하수 유입배수관을 분리, 2) 횡배수관을 낮게 배치하여 항상 습윤상태 유지, 3) 중앙배수관을 배제한 바닥배수재 적용을 들 수 있다.

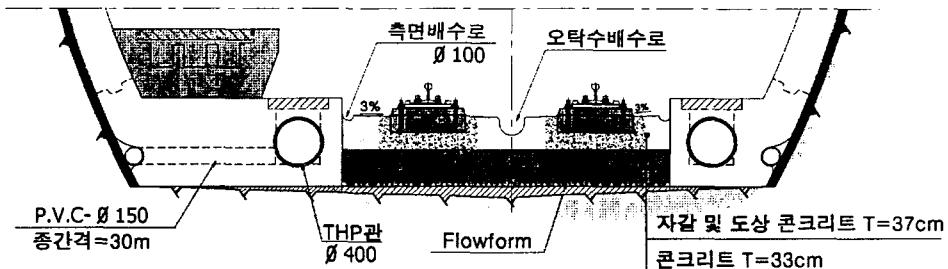


그림 6. 터널 배수단면

#### 5. 맺음말

본 과업의 특징으로는 국내 최장 터널의 계획 및 단층과 폐광이 산재한 문제성 지반에서의 터널건설과 같은 토목관련사항과 철도터널 최초의 환기방재 개념과 콘크리트 도상의 도입을 들 수 있다. 이 중에서 본 논문은 토목분야 관련사항을 중심으로 터널의 시공계획과 주요 설계사항을 소개하였다. 본 논문에서 소개하지 못한 사항들은 다른 지면을 빌려 지속적으로 소개하고자 한다. 그리고 앞으로 현장 시공성과에 대한 현 설계의 분석 및 평가를 통하여 장대터널에 대한 기술축적을 도모할 계획이다.

#### 참고문헌

1. 영주지방철도청(1997) 영동선 통리~심포리간 산골터널 긴급보강공사 준공보고서.
2. Bieniawski, Z. T.(1989) Engineering Rock Mass Classifications; A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering, Wiley.
3. Grimstad, E. and Barton, N.(1993) Updating of the Q-system for NMT, First International Symposium on Sprayed Concrete.
4. Sinha, R.S.(1989) Underground Structures; Design and Instrumentation, Elsevier.