

국내 최초 도심도 복층터널의 계획

- 서부간선 지하도로 프로젝트 관련



정재호
서영엔지니어링
지하공간팀
부장



전덕찬
유신코퍼레이션
터널부
부사장



신일재
현대건설
토목환경사업본부
부장



심동현
현대건설
토목환경사업본부
상무

1. 사업의 추진 배경

1990년대 이후 서울시에서는 급격한 차량의 증가에 따른 교통정체가 심각한 문제로 부각되었다. 이를 해결하기 위해 2000년도에 서울시는 『서울특별시 교통정비 중기계획』을 수립하였으며 그림 1과 같이 서울 한강 이남지역에 강남순환 고속도로를 신설하여 남부순환로와 올림픽대로의 교통량을 분산처리하고 강북의 내부순환로와 연계되는 서울시 순환형 도로망 구축을 추진하였다. 강남 순환 고속도로는 총 연장 34.8km로서 이중 시흥U/D~선암IC 구간인 강남순환고속도로 동서구간은(22.9km) 5개 공구로 분할하여 2007년 7월 착공했고, 2014년 완공을 목표로 건설 중에 있다.

강남순환고속도로의 남북구간인 서부간선도로구간은 성산대교와 서해안 고속도로를 연계하는 구간으로 수도권 서남부권에서 서울 도심지를 연결하는 유일한 남북 고속간선 축이다. 서부간선도로는 노선 전체에 걸쳐 다수의

유·출입로가 교차하며 안양천 주변 주거 지역과 공장 밀집지역을 통과하는 도심지내 간선도로이기도 하다(그림 2). 이러한 특성으로 인해 서부간선도로 구간은 일 교통량이 약 112,000대/일로 현재 서울시 간선도로 중, 지·정체

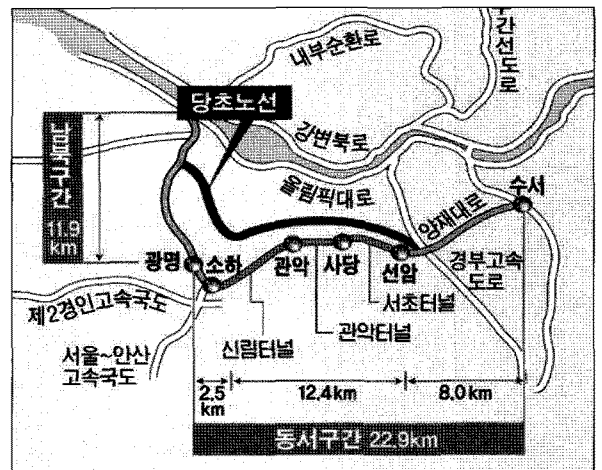


그림 1. 강남순환도로 계획

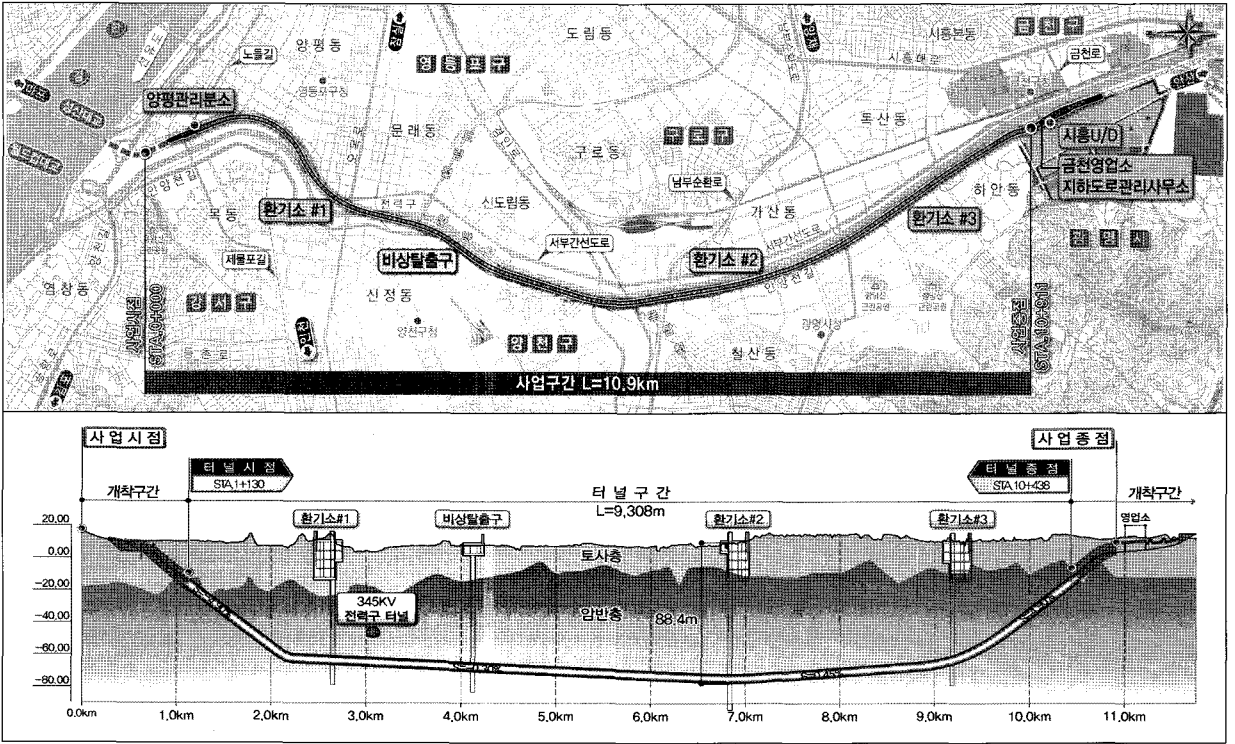


그림 3. 평면 및 종단 노선계획

남단)을 시점으로 양천구, 구로구, 경기도 광명시, 서울시 금천구를 연결하는 총 연장 10.9km의 양방향 4차로 소형차 전용도로로서 잔출입부를 제외하면, 최소 곡선반경 1,500m, 종단 경사 -0.3~0.45%의 평면 및 종단선형계획을 수립하여 지하도로 선형의 연속성 및 주행안정성을 확보하였다(그림 3).

서부간선도로 주변에는 안양천 및 밀집된 도심이 위치하고 있어, 여유부지가 절대적으로 부족한 상황이므로 지상공간 영향 최소화를 위해 대심도 복층터널 형식을 적용하였다. 그로인해, 시·중점부 진·출입구간(L=1.6km)에는 그림 4에서 볼 수 있듯이 단층구조에서 복층구조로 변화하는 개착구조물이 계획되어 있다. 또한, 중앙부 대심도 터널구간(L=9.3km)에는 국내 최초로 NATM공법에 의해 복층터널을 건설할 예정이다.

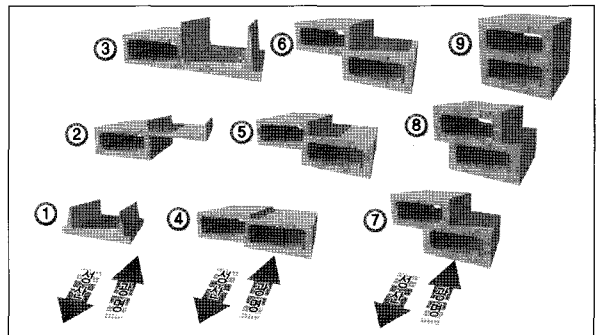


그림 4. 시·중점부 개착구조물 계획

복층터널은 최대 88.4m의 대심도 암반에 위치하고 있으며, 전력구 등 기존의 천심도 지하기반시설물과 충분한 이격거리를 확보하였다.

환기를 위한 수직구 3개소 외에 비상시 외부 탈출로 확

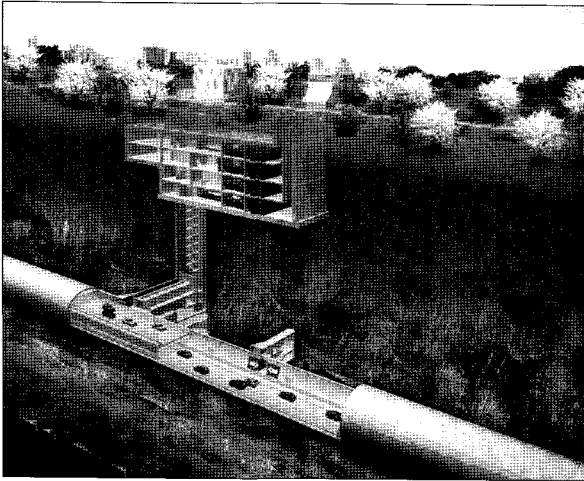


그림 5. 터널내 비상 외부 탈출구 현황



그림 6. 금천영업소 현황

보를 위한 비상탈출구 1개소를 추가 계획하였고, 최대 250m 이하의 간격으로 총 35개소의 피난연결통로를 설치하여 터널내 비상상황 발생시 대피할 수 있도록 하였다(그림 5). 그밖에, 종점부에는 관리사무소 기능을 겸한 금천영업소(그림 6)가 위치하고 있으며, 시점부에는 유지관리 효율성 증진 및 방재기능 강화를 위해 양평관리분소를 계획하였다. 또한, 도심도 구간내 유출입시설 배제를 전제로 한 이동성 위주의 지하도로임을 고려하여 시·종점부 월드컵 대교 직결연결로, 시흥U/D 및 일직JCT 연결로 등 교차로 계획을 통해 주변도로와 접속시킴으로써 교통흐름을 개선하고 인근 지역주민의 이용편의를 도모하였다.

2.2 복층터널 단면 및 굴착계획

복층터널은 지상공간 영향의 최소화, 경제성 증진 등의 이유로 도심지 터널계획시 적용성이 우수하며, 주로 해외의 도심지 터널사례에서 찾아볼 수 있는 터널형식이다. 최근 국내에서도 복층터널에 대한 관심이 증가하고 있으나, 소형차 전용 복층터널의 계획에 관한 제반사항을 규정하고 있는 설계기준 및 지침이 미비한 상태이다.

표 1은 해외에서 시공·운영중인 소형차 전용의 도심지

표 1. 해외 복층터널 사례

구분	A86 동터널	Fuxing 터널	SMART터널
단면도			
제한속도	70km/h	40km/h	60km/h
길어깨폭	2.80m	0.50m	2.20m
환기방식	횡류식	제트팬 종류식	수직구종류식
LCS	0.30m	0.30m	0.20m

표 2. 복층터널 표준단면 구성요소

단면적	129.0m ² ~138.3m ²
횡단경사	±2%~±4%
풍도면적	7.09~8.78m ²
검사원통로	750×2,000mm
공통구	700×700mm
정보표지	350×350mm

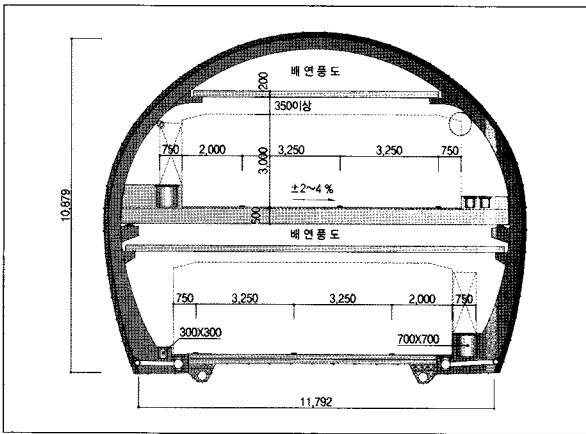


그림 7. 복층터널 표준단면

복층터널 사례로서 차로폭 3.0~3.25m, 시설한계 높이 2.0~2.55m 및 비상차로 2.2~2.5m를 적용하였으며, 특히, LCS & QWS 설치공간 20~30cm, 두께 30~60cm의 분리구조 중앙슬래브 및 본선터널과 분리되는 대피소계단 형태의 피난연결통로가 계획되어있다.

서부간선 지하도로는 국토해양부에서 제시한 소형차도로의 횡단구성 및 시설한계(2009)를 만족하도록 단면 계획을 수립하고, 상기한 해외사례를 분석하여 단면내 여유공간 확보 및 시설계획에 추가적으로 반영하였으며, 특별히 우측 길어깨 폭을 2.0m로 확대 적용함으로써 병렬 터널의 차량용 피난연결통로와 같이 비상시 구급차량이 통과할 수 있는 공간을 확보하였다. 표 2와 그림 7은 본선 표준단면 및 주요 구성요소이다.

그림 8은 복층터널 구간에 총 4개소 설치된 수직구의 표준단면이다. 각 수직구는 운영중 터널내 환기통로로 사

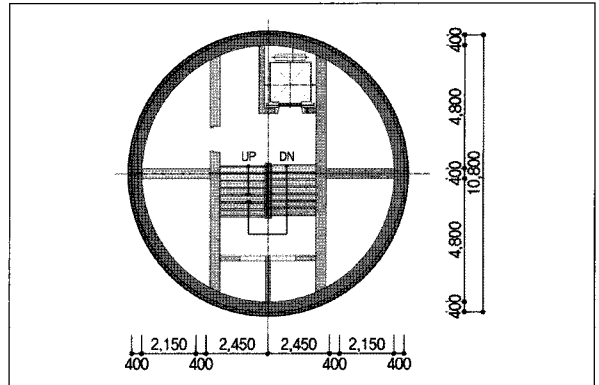


그림 8. 수직구 표준단면

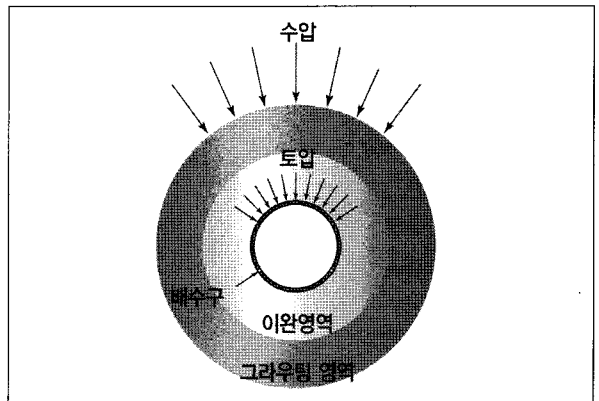


그림 9. 수입하중 개념도

용되며, 사고발생시, 외부탈출로의 기능을 수행할 뿐만 아니라, 공사중에는 작업구로 활용할 수 있도록 계획하여 총 10개의 작업조를 동시에 투입하는 공기단축 방안을 수립하였다(그림 10).

수직 환기구를 이용한 공기단축이 용이할 뿐만 아니라, 국내 시공실적이 풍부하여 암반조건 변화에 대응성 및 경제성이 우수하다는 장점을 고려하여 대심도 터널의 굴착 공법으로 NATM공법을 적용하였다.

서부간선도로 인접지역에는 목감천과 도림천이 안양천과 합류하여 한강에 유입되는 복잡한 수계가 형성되어 있고, 염리궤적 등의 다양한 지질구조 분석결과를 볼 때, 다수의 단층파쇄대가 터널과 교차하고 있을 것으로 예상되어

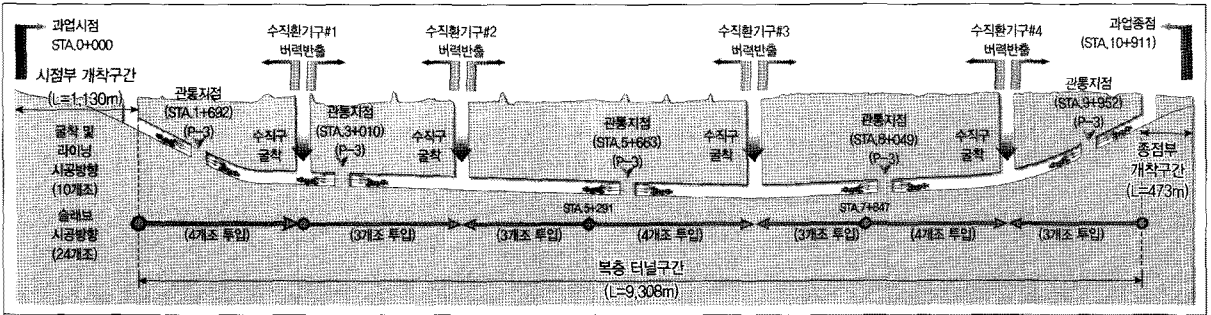


그림 10. 대심도 터널 굴착계획

터널굴착에 따른 지하수 거동 영향 최소화 및 지반보강을 위한 대책수립이 필요한 것으로 판단하였다. 실제로 다양한 위치와 심도에서 수압시험을 수행한 결과, 암반 투수계수가 $1.62 \times 10^{-4} \sim 3.569 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 의 분포를 보여, 대심도 암반 구간에서도 높은 투수성을 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

따라서, 경험적 암반분류법 뿐만 아니라, 국내 지하철과 3~4차로 대단면 터널 설계 및 시공사례를 종합적으로 고려하여 보강계획을 수립하였으며, 특히, 높은 투수성의 암반구간에서는 차수그라우팅 공법을 적용하여 시공성 및 안정성 향상을 도모하였다.

경제성 향상을 위해 배수형 터널로 계획하되, 도심지 터널임을 고려하여 차수공법을 병행함으로써, 터널굴착에 따른 광역적 지하수 유동 및 터널내 지하수 유입을 최소화하였으며, 터널내 유입량 기준($3.0 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$) 이하의 유입수는 총 4개조의 수직구에 설치된 펌프를 이용하여 배수하는 계획을 수립하였다.

또한, 세이칸 터널, 영불해저터널 등 해외의 해저터널 사례를 참조하여 차수그라우팅으로 인한 투수경계 변화 및 수압감소 효과를 콘크리트 라이닝 설계에 반영하였다(그림 9).

2.3 복층구조물 계획

복층터널의 중앙슬래브는 터널로 유입되는 교통류를 상하부 차로로 분리함과 동시에, 상부 차로 차도로서의 기능을 담당한다. 그러므로, 중앙슬래브를 포함하는 복층구조

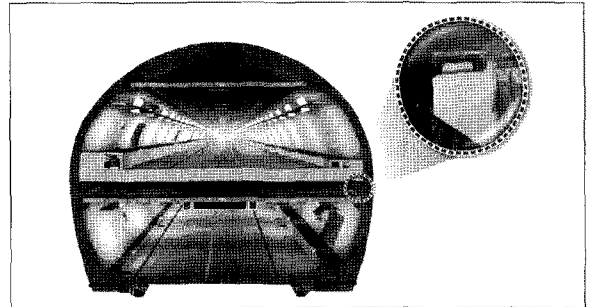


그림 11. 복층터널 표준단면

계획시, 특별히 고려해야 할 사항은 중앙슬래브에 작용하는 자중과 차량하중(DB-13.5)를 콘크리트 라이닝이 안정적으로 지지할 수 있는 연결구조를 확보하는 문제이다.

중앙슬래브와 라이닝을 연결구조로 계획하는 경우, 중앙슬래브와 라이닝간 상호 하중작용에 의해 라이닝 부재력이 증가하여 철근보강이 과다해 질 뿐만 아니라 축인장력이 발생하는 중앙슬래브에도 Tendon을 이용한 프리스트레스 구조를 도입해야 한다. 따라서, 중앙슬래브와 라이닝을 분리하는 연결구조를 적용함으로써, 터널라이닝에 작용하는 부가적인 하중을 최소화하고 중앙슬래브에도 휨거동을 유도하여 경제성 및 안정성을 확보하였다.

분리구조를 적용한 중앙슬래브는 터널라이닝과 연결된 슬래브 지지용 브라켓 상부의 탄성받침에 거치하도록 계획하였으며, 탄성받침 간격을 2m로 설정하여 1방향 슬래브 거동을 유도하였다(그림 11).

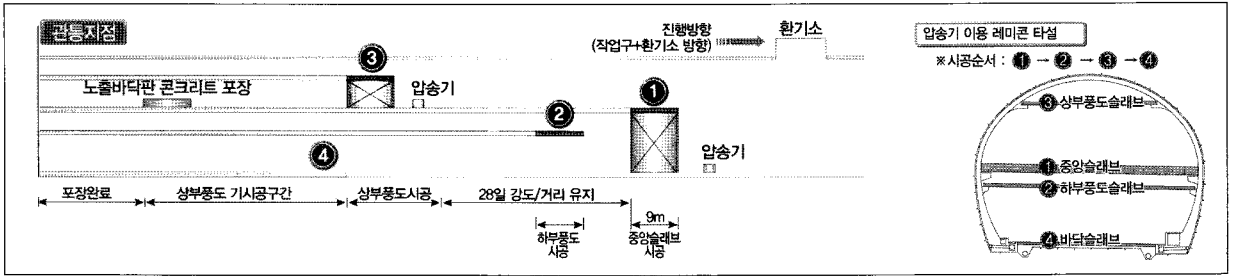


그림 12. 터널 내부 슬래브 시공계획

복층터널 라이닝에 작용하는 설계하중은 자중, 이완하중, 잔류수압, 온도하중 뿐만 아니라 브라켓에 의해 전달되는 슬래브 작용하중이 추가되므로, 터널 전 구간의 라이닝에 철근 보강계획을 수립하여 대단면 터널 라이닝의 안정성을 확보하였다.

서부간선지하도로의 내부에는 중앙슬래브와 대단면 콘크리트 라이닝 이외에도 상하층에 각각 풍도슬래브가 계획되어 있다. 풍도슬래브는 화재발생시 사용할 배연전용 풍도공간을 확보할 목적으로 설치되는 구조부재이다. 따라서, 슬래브 자중과 풍압 이외에 별도의 외력은 작용하지 않으나, 중앙슬래브와 동일한 개념으로 구조적 안정성을 확보하는 브라켓 지지형 분리구조를 적용하였다. 현장 타설되는 중앙슬래브 및 상부 풍도슬래브와 달리, 하부 풍도슬래브는 복층구조의 특성상, 시공 여유공간이 부족함을 고려하여 소규모의 PC부재를 거치하는 방식으로 동시시공 함으로써 공기를 단축할 수 있는 시공계획을 수립하였다(그림 12).

2.4 복층터널 환기 및 방재계획

서부간선지하도로는 도심지 지하공간을 이용하는 연장 10.9km의 초장대터널로서, 도시지역 1,000미터 이상의 터널에 해당되므로 화재시를 대비하여 횡류 또는 반횡류식 제연방식을 적용해야 한다(국토해양부 2009). 한편, 소형차 전용도로로서 오염물질 배출량이 작고, 교통량 분

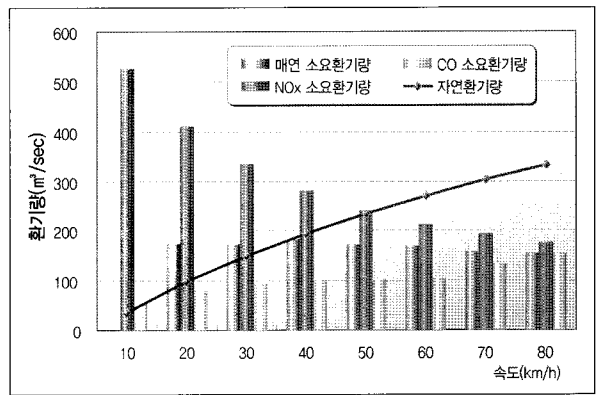


그림 13. 환기량 검토

석 결과 서비스 수준 “C” 이상의 소통이 원활한 터널에 해당되어 그림 13에서 보는 바와 같이 차량 지체시를 제외하고는 시속 60km/h 이상의 속도로 운행하는 차량압에 의한 자연환기가 가능하다.

따라서, 평상시 교통환기력을 이용하여 경제성 측면에서 유리하면서도, 화재시에는 횡류식의 우수한 배연성능을 발휘할 수 있는 환기방식의 도입을 검토하였으며, 그림 14와 같이 차량지체시, 수직구를 이용하여 종류식으로 급·배기하고 화재시에는 화재지점 대배기구를 개방하여 풍도를 통해 배연하는 수직구종류식+집중배연방식을 적용하였다. 표 1의 해외 소형차 전용 복층터널 사례에서도 제트팬 및 수직구를 이용한 종류식 환기 또는 수직구 횡류식 환기방식 등을 다양하게 적용하고 있음을 알 수 있다.

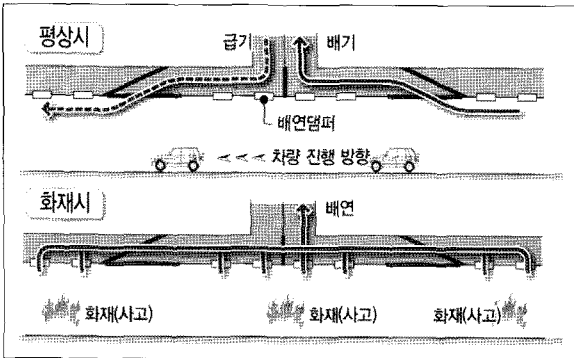


그림 14. 환기 및 배연시스템 개요

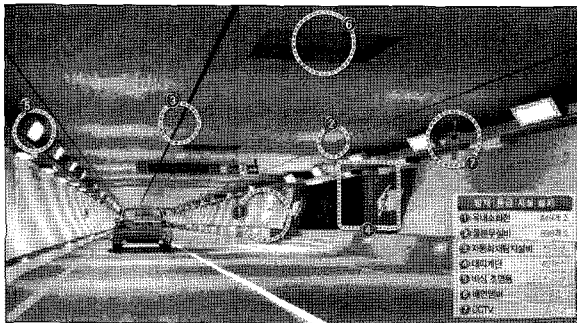


그림 15. 주요 방재시설

또한, 환기소가 위치한 지역의 오염물질 농도가 환경기준을 만족하고 있으나, 인근 주거지역으로부터의 민원발생 가능성을 최소화하기 위하여 미세먼지 제거효과가 우수한 전기집진설비 설치를 계획하였다.

서부간선 지하도로는 연장 기준으로 방재1등급 터널이지만, 위험도기준으로는 방재2등급에 해당하는 터널로서, 피난연결통로, 비상주차대, 소화기구 및 옥내소화전 등의 방재시설만을 설치하도록 되어 있다(국토해양부, 2009). 그러나 도심지 대심도 터널임을 고려하여 수직구를 이용한 피난대피터널(외부탈출로), 물분무 설비를 추가적으로 계획하였다(그림 15).

화재시에는 자동화재감지설비, 영상유고감지시설 등을 설치하여 사고상황을 신속히 파악·전달할 수 있게 하였으며, 50m 간격의 대배기구를 이용하여 화재지점 200m구

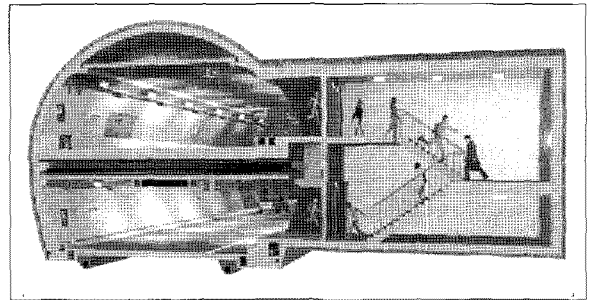


그림 16. 상·하층간 피난연결통로

간을 집중배연함으로써 연기확산을 억제하고 250m 간격의 피난연결통로와 수직구 내부의 지상탈출로를 통해 인명이 대피할 수 있도록 하였다(그림 16). 또한, 소형응급차량을 운영하여 2m 폭의 비상차로를 통한 신속한 구난이 가능하고, 인명대피 이후에는 옥내소화전과 이중헤드형 물분무설비를 이용하여 화재를 진압할 수 있도록 하였다.

3. 향후 전망

현재 서부간선도로는 혼잡시간대에 안양천교에서 성산대교 진입시까지 약 47분이 소요되는 극심한 정체에 시달리고 있다. 더 나아가 장래(2014년)에는 서울~광명간 고속도로 등의 관련 도로계획을 고려한다해도 평균속도 16km/h, 통행시간 51분으로 지·정체 현상이 더욱 심화될 것으로 예상된다.

서부간선지하도로 건설을 통하여 기존 서부간선도로의 통행량을 분담함으로써 평균 속도 60km/h 내외, 통행시간 약 14분으로 장거리 교통수요의 고속간선 서비스 제공이 가능할 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 장거리 교통량이 지하도로로 분산됨으로써 이면도로 등 기존 서부간선도로 주변 공간을 여유롭게 확보할 수 있게 되므로, 그림 17에서 볼 수 있듯이, 녹지공간을 확보하고 자전거도로를 설치하는 등 친환경적 지상공간으로의 환경개선이 가능하다.

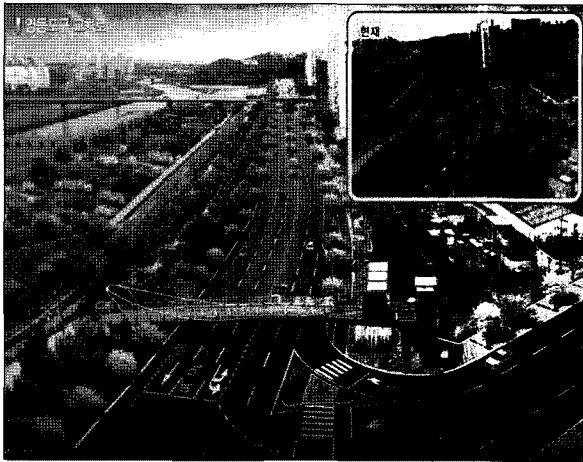


그림 17. 자성의 기존서부간선도로 환경개선방안

전술한 바와 같이, 서부간선 지하도로는 국내 최초의 도심지 대심도 복층터널로서, 천심도 기반시설물과의 간섭이 없고 지상공간 영향을 최소화 할 뿐만 아니라, 부가적으로 친환경적 지상공간을 확보할 수 있는 장점이 있어 향후, 도심지 지하도로 계획시, 고려되는 주요 실적으로 자리잡을 가능성이 높은 선도적 사업이다.

그러나, 2010년 현재, 대심도 지하공간 개발과 관련된 법령의 제정 뿐만 아니라, 각급 기관의 소형차 전용도로 및 복층터널에 대한 설계기준 또는 지침 등이 확정·공포되지 않은 상태로 그 위계구분과 적용에 있어 한계가 있는 실정이다.

따라서, 기하구조, 단면계획 및 환기·방재 등 대심도 복층터널의 다양한 특성을 고려한 기술적 개념 정립이 추가적으로 필요한 상황이다.

2010년, 기본설계 및 기본설계 VE가 진행된 서부간선 지하도로 민간투자사업은 2011년에 대정부 협상, 실시설계 및 실시설계VE 단계가 진행될 것으로 전망된다. 각 사업진행 단계별로 제 기준 및 지침의 새로운 변경사항들을 반영하고 세부사항들을 심화발전시켜 착공단계에 이르기 전까지 더욱 안전하고 경제적인 지하도로 계획으로 조정해 나갈 예정이다.

끝으로, 국내에서 처음으로 도입되는 도심지 대심도 복층터널이, 계획단계에서 뿐만 아니라, 시공 및 유지관리 단계까지 성공적으로 수행되어 친환경적이고 지속가능한 지하공간 개발에 의미있는 발자취를 내딛게 되길 기대해 본다.