

대심도 · 장대 철도터널의 방재 및 환기계획



오세준
(주)삼보기술단
대표이사



김남영
(주)삼보기술단
철도사업본부 상무



이 항
(주)삼보기술단
철도사업본부 부장



이호석
(주)비엔텍아이엔씨
대표이사

1. 서론

수도권 신도시의 교통수요를 충족시키기 위한 광역철도방식은 기존 지하철을 비롯하여 상수도, 전기, 통신, 하천 등의 지하 지장물에 대한 간섭을 최소화하고, 토지 보상비의 절감을 위하여 깊이40m 이상의 대심도로 계획되고 있다. 아울러 타 교통수단과의 상대적 비교우위를 확보하기 위하여 준고속 철도차량이 운행되며, 정거장간 거리가 약 10km정도의 장대터널로 계획되므로, 대심도 및 터널장대화에 따른 본선터널 및 정거장의 피난 및 환기문제가 우려된다. 특히, 본선터널에서 지상까지의 대피로는 경제성과 지상의 설치면적을 고려하여 환기구와 병행하여 설치하는 것이 바람직하다. 그러므로 본고는 방재 및 환기측면에서 본선 터널의 환기구 간격과 정거장의 피난 시설물에 대한 최적의 설계안을 제시하고자 한다.

2. 본선 환기구(대피로) 계획

2.1 개요

본선 환기구는 환기를 수행하는 고유의 기능뿐만 아니라, 공사중 장비투입, 운영중 유지관리 등의 기능도 필요하며, 정거장간 거리가 10km 이상인 장대터널인 경우에는 방재적 기능이 무엇보다 우선되어야 한다. 정거장간 거리가 약 1~2km에 불과한 도시 지하철의 기준 및 사례를 그대로 당 대심도 장대터널구간에 적용할 경우 경제적

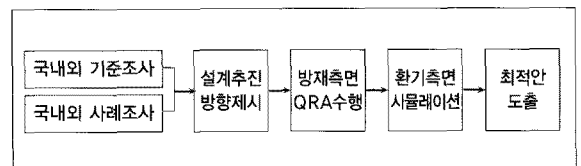


그림 1. 검토흐름도

이지 못하므로, 그림 1과 같은 과정으로 최적화된 환기구(대피로)간격을 도출하고자 한다.

2.2 설계조건

본선 환기구(대피로)간격을 설정하기 위한 터널구조물 및 열차운영기준은 표1과 같다.

2.3 대피로 간격검토

2.3.1 주안점

최근 철도차량의 내장재가 불연성 및 난연성 재질로 변경되어 화재발생율이 감소되었지만, 터널의 장대화과 승객의 증가에 의하여 위험도는 결코 감소되고 있지 않다. 일반적으로 터널화재시 차량을 정거장(승강장)에 정차시켜서 승객을 탈출시키는 것을 기본으로 한다. 그렇지만, 정거장간 거리가 10km이상인 경우는 화재차량이 본선 터널에 정차할 확률이 높으므로, 본선환기구에 대피로를 병설하여 지상으로 대피시키는 것이 바람직하다. 그러므

표 1. 터널구조물 및 열차운영기준

| 구분 | 기준 | 비고 | |
|-----|----------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구조물 | 본선 연장 | 50km |  복선직선구간 표준단면 |
| | 역간평균거리 | 10km | |
| | 최급기울기 | 25% | |
| | 평균심도 | 50m | |
| | 환기구간격 | 2.5km | |
| | 터널둘레 | 30m | |
| | 대표직경 | 8m | |
| | 터널내공단면 | 60m ² | 라이닝 작업 후 최종단면기준 |
| | Walk way | 80cm×2개소 | 터널양측 |
| 운영 | 차량 | 전동차 | 2M2T |
| | 최고운영속도 | 180km/h | 준고속 |
| | 시격 | 4.5분 | |
| | 승차인원 | 474명/편성 | |

로 본선에서 지상으로 대피할 수 있는 대피로의 적절한 간격에 대하여 검토하고자 한다.

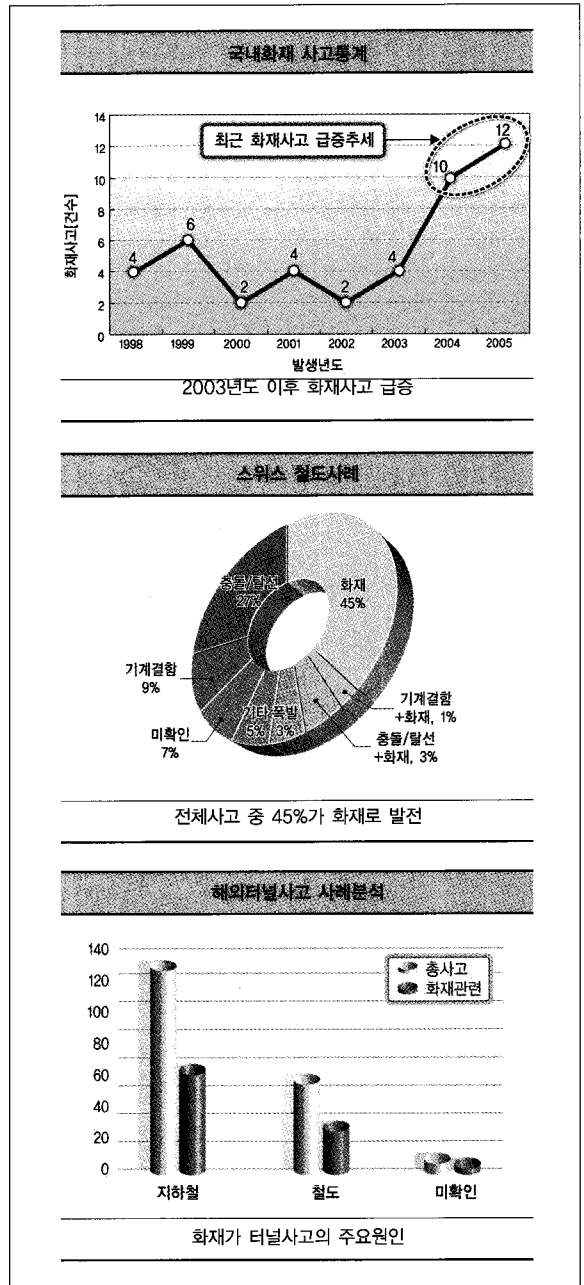


그림 2. 철도화재 사고사례 분석

2.3.2 철도터널 사고사례분석

국내외 철도터널 사고사례를 그림 2와 같이 분석한 결과, 철도터널화재의 증가율이 급증하고 있다.

약 2.8km, 최고높이 약 50m로 설계되었다. (그림 3 참조)

○ 경부고속철도

현재 운영중인 경부고속철도내 원효터널 및 금정터널은 고속철도 방재기준을 적용하여 환기구 간격 2.5km로 설계되었다. (표 4 참조)

2.3.3 설계기준 검토

국내·외의 설계기준을 표2 및 표3과 같다.

2.3.4 대피로 간격 설계사례

가) 국내사례

○ 신분당선

현재 공사 중인 신분당선사업의 청계부터 관교까지의 정거장간 거리 8km인 복선터널구간에 환기구가 최대간격

나) 해외사례

단선 병렬 터널과 복선 터널의 대표적인 해외사례는 표 5와 같다.

2.3.5 검토방향

현재 국내에는 당 프로젝트에 정확하게 부합되는 규정

표 2. 국내설계기준

| 기 준 | 항 목 | 검 토 결 과 |
|--------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 도시철도법 서울시중합안전대책 도시철도건설규칙 | 적용대상 | • 수도권구간에 운영되는 차량 • 정거장간 거리가 1~2km이고 심도 20~30m정도 |
| | 설계기준 | • 특별한 사항이 없음 |
| 철도시설 안전규칙에 관한 규칙 제4조 (2006.09.22) | 적용대상 | • 일반철도 |
| | 설계기준 | • 시뮬레이션 및 안전성 분석 (QRA)을 통한 방재주요구조물 적용 여부 및 범위 제시 |
| 고속철도 터널방재기준 (2005.09.16) | 적용대상 | • 고속철도 |
| | 설계기준 | • 대피통로 간격은 터널내 가장 가까운 대피통로까지의 최대거리가 1.25km이내가 되도록 2.5km 이내로 유지 • 터널연장이 15km 이상이 되는 터널은 구난승강장 설치 • 현재 철도시설 안전규칙에 관한 규칙 제4조로 통합 |

표 3. 해외설계기준

| 국 가 | 관련법규 | 항 목 | 설 계 기 준 |
|-----|----------|---------|---------------------------------|
| 미 국 | NFPA 130 | 피난연락경 | • 244m 간격, 1.5시간이상 내화가능한 방화문 설치 |
| | | 비상탈출구 | • 762m 간격 |
| 일 본 | 국토교통성 | 피난연락경 | • 500m 간격 |
| 독 일 | E B A | 피난연락경 | • 철도 : 1,000m 간격, 지하철 300m간격 |
| | BOStrab | 피난연락경 | • 600m 간격 |
| 영 국 | - | 피 난 통 로 | • 터널내 피난통로 설치 간격 750m |
| | | 수 직 구 | • 3,000m 간격으로 설치, 경제성 고려 |

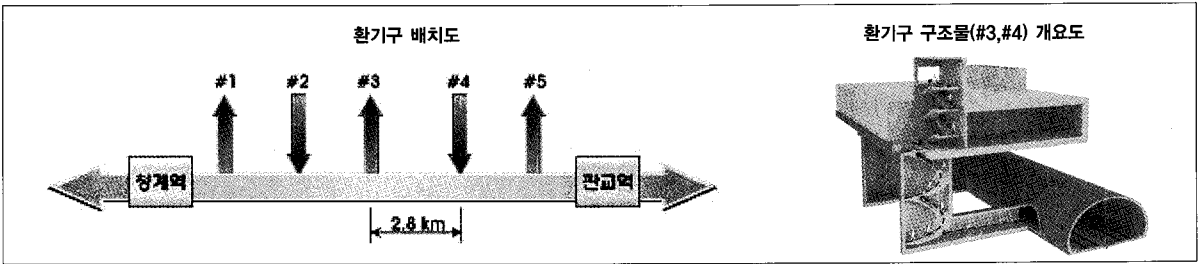


그림 3. 신분당선 사례

표 4. 경부고속철도 사례

| 터널명 | 연장 | 개요도 | 대피시설물 |
|------|----------|-----|----------------------------|
| 원호터널 | 13.270km | | 2.5km이내에 환기구, 사갱, 구난대피소 적용 |
| 금정터널 | 20.260km | | |

표 5. 해외사례

| 구분 | 유로터널 | 세이칸터널 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 위치 | <p>United Kingdom France</p> <p>영불해협</p> | <p>일본(홋카이도~ 혼슈)</p> |
| 개요도 | <p>① Main tunnel ② Service tunnel ③ Connecting tunnel ④ Relief duct</p> | <p>① Main tunnel ② Service tunnel ③ Pilot tunnel ④ Connecting tunnel</p> |
| 터널연장 | 50.45km | 53.85km |
| 해저구간 | 38km | 23.3km |
| 해저깊이 | 평균 45m | 최대 240m |
| 교통방향 | 일방향 | 양방향 |
| 터널직경 | 주행터널 : 7.6m, 서비스터널 : 4.8m | 4.85m |
| 방재시설 | 피난연결통로 : 375m, 환기구 : 2개소 | 화재열차 정차 구난대피소 2개소(운영터널외부 환경과 유사) |

이 없으므로 유로터널과 같이 단선병렬터널과 별도의 서비스터널을 계획하거나, 세이칸 터널처럼 구난대피소를 계획하면 방재상 안전도는 높아지나 경제성측면에서 상당히 불리하다.

그러므로 국내철도터널 신분당선 및 고속철도 사례를 참조하여 환기구(대피로) 최대간격 2.5km을 기준으로 하고, “철도시설 안전기준에 관한 규칙”에 의거하여 QRA를 통한 안전성분석을 검토하고자 한다.

2.3.6 정량적 위험도 분석(QRA)

가) 정의

정량적 위험도 분석 QRA(Quantitative Risk Analysis)는 사고시 사망수(N)와 사고발생확률(F)의 곱으로 정의되어 통계학적 방법에 의해서 정량적으로 산출하는 기법을 의미한다.

표 6. 국가별 사회적 위험기준

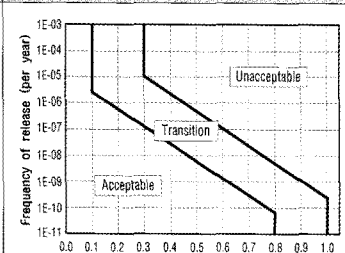
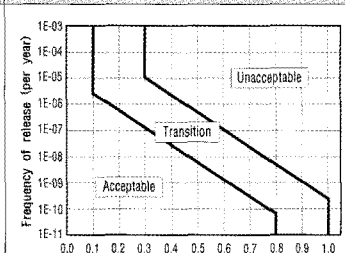
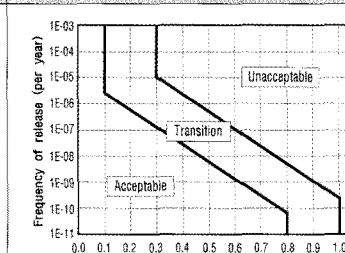

| 구분 | 스위스 | 영국 | 홍콩 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 영역 분포 |  |  |  |
| 적용 범위 | <ul style="list-style-type: none"> • 위험시설(Hazardous Facilities) • 광범위한 범위의 위험활동을 포함 | <ul style="list-style-type: none"> • 위험물(DG, Dangerous Goods) 수송루트와 근접한 곳 | <ul style="list-style-type: none"> • 잠재적 위험시설 (Potentially Hazardous installations) |
| 위험 구간 | <ul style="list-style-type: none"> • Unacceptable > Transition > Acceptable | <ul style="list-style-type: none"> • Intolerable > ALARP > Negligible | <ul style="list-style-type: none"> • Unacceptable > ALARP > Acceptable |

표 7. 분석기준

| 구분 | 내 용 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 화재규모 | <ul style="list-style-type: none"> • 화재열량 10MW에 대한 본선 내 화재위험을 분석함 • 열차 정차 지연시간 및 초기 진화실패를 고려하여 초기화재(0초)는 5MW를 적용하여 분석함 - 코펜하겐 메트로 논문 참조 : Emergency Tunnel Ventilation (Nick Mavromihales, 2002) |
| 제연방식 | <ul style="list-style-type: none"> • 제연모드에 의한 제연팬 가동 |
| 화재지점 | <ul style="list-style-type: none"> • 4량기준 열차의 각 지점별 화재특성을 고려하기 위하여 열차 지점별(5지점) 화재를 적용함  |
| 피난방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 화재발생 지점에 따른 가장 근접한 피난구역(정거장, 환기구)으로 대피함 • 본선부 화재시 모든 피난인원은 Walkway를 통하여 피난을 수행함 • 초기진화 실패를 고려한 화재특성적응으로 피난은 정차와 동시에 진행하는 것으로 가정함 |

나) 설계기준 (F-N curve)

대표적인 국가별 사회적 위험기준 (F-N curve)는 표 6 과 같다.

국내에는 법적 기준은 없으므로, 검토된 상기 기준 중 에 상대적으로 가장 엄격한 홍콩기준 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$)을 적용하여 검토한다. ALARP는 'As Low As Reasonably Practicable'의 약자로서 경제성에 입각하여 '행할 수 있는 한 위험도를 낮게'라는 의미이다.

다) 분석기준 (표 7 참조)

라) 분석Case (표 8 참조)

마) ETA (Event Tree Analysis) (그림 4 참조)

바) 위험도 분석결과 (표 9 참조)

2.3.7 검토의견

전술한 2.2 설계조건을 기준으로 제연팬, 비상조명등, 유도표지판 등을 고려하여 QRA를 수행결과 환기구(대피

표 8. 분석Case

| 구 분 | Case1 | Case2 | Case3 | 비 고 |
|------|--------|--------|--------|----------------------------|
| 연장 | 3.0km | 2.9km | 2.6km | 분석대상 연장의 100m 간격으로 화재발생 적용 |
| 시나리오 | 1,160개 | 1,120개 | 1,000개 | |

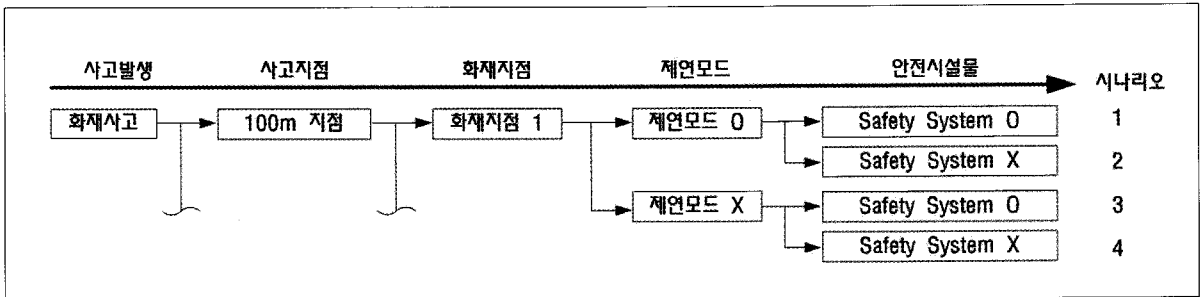


그림 4. Event Tree Analysis

표 9. 위험도 분석결과

| 구 분 | Case1 (3.0km) | Case2 (2.9km) | Case3 (2.6km) |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| F-N curve | | | |
| 리스크 영역 | Unacceptable | ALARP | ALARP |
| 리스크 (ΣR) | 1.2942E-03 | 8.6040E-04 | 4.5486E-04 |

로)간격이 최대 2.9km까지 가능한 것으로 판단되나, 안전율을 감안하여 2.5km가 타당할 것으로 판단된다.

향후 운영조건이 현재보다 악조건으로 변경되면 환기구 최대간격이 감소될 수 있지만, 그림 5와 같이 방화문, 본선제트팬, 전실 등의 기본적인 방재설비 시설을 계획하면 환기구(대피로) 간격 2.5km는 안전한 것으로 판단된다.

2.4 환기측면의 환기구 간격검토

2.4.1 개요

방재측면의 안전성 분석을 통한 환기구 2.5km 간격이 검토된 바, 이 거리의 환기구가 환기 및 제연측면에서도 적절한 거리인지 검토한다.

2.4.2 설계기준

환기적 측면의 터널내 온도는 34.5℃로 유지하여 여름철 최고 설계외기온도인 30.5℃ 보다 4℃를 초과하지 않도록 한다. 제연측면은 도시철도건설규칙기준의 제연풍속인 2.5m/s를 만족시키도록 한다.

2.4.3 환기구 간격검토

가) 환기설비 용량

환기(열환경)측면의 환기풍량보다 제연기준풍속 2.5m/s를 만족시킬 수 있는 제연풍량이 크므로, 제연풍량에 의하여 환기설비용량이 선정된다. (표 10 참조)

나) 환기시뮬레이션

자연환기시 본선내에는 교通风력에 의한 높은 유속으

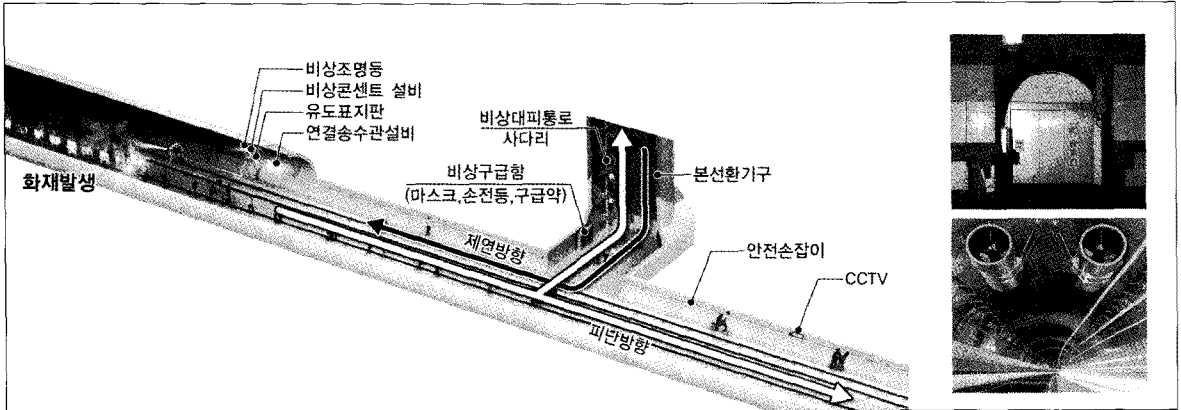


그림 5. 본선터널내 방재설비 설치사례

표 10. 설계풍량검토

| 구 간 | 환기 모드 | 설계 풍량 | | 환기설비 팬 풍량 [CMM] | 환기설비 팬 대수 [EA] | 선 정 |
|------|-------|-----------------|----------------|--------------------|-------------------|-----|
| | | 열환경 기준 [CMM] | 제연 기준 [CMM] | | | |
| 복선터널 | 배기 | 6,150 | 8,200 | 2,050 | 4 | 제연 |
| | 급기 | 9,230 | 12,300 | 3,075 | 4 | 제연 |
| | 배기 | 6,150 | 8,200 | 2,050 | 4 | 제연 |
| | 급기 | 9,230 | 12,300 | 3,075 | 4 | 제연 |
| | 배기 | 6,150 | 8,200 | 2,050 | 4 | 제연 |

로 본선내 온도감소 효과가 발생된다. 그렇지만, 자연 환기시 상하행열차가 정착되는 정거장부근에서는 표 11과 같이 환기효과감소로 기준온도를 초과한다. 그러므로 정거장의 온도상승방지를 위하여 자연환기시에도 TES(선로 부 환기시스템)를 별도로 가동하는 것이 필요하다.

다) 공기유동 시뮬레이션 검토

본선터널내 환기구 ±100m구간의 자연환기시 공기유동에 관한 시뮬레이션으로서 환기구 간격 2.5km에 관하여 원활한 공기흐름이 형성됨을 표 12는 보여준다. 향후 세부적인 터널 및 차량 제원이 결정되면 최적화된 환기구

표 11. 상하행열차 동시정차하는 정거장 구간의 환기시뮬레이션 결과

| 구분 | 자연 환 기 | 기 계 환 기 |
|--------|-----------------|----------------|
| 결과 그래프 | | |
| 기준온도 | 34.5°C | 34.5°C |
| 최대온도 | 34.8°C | 30.4°C |
| 평균온도 | 16.8°C | 25.6°C |
| 결과 | 기준온도 34.5°C 불만족 | 기준온도 34.5°C 만족 |

표 12. 본선터널내 환기구 ±100m구간의 자연환기시 공기유동 시뮬레이션 검토

| 구분 | Time1 (39초 경과시) | Time2 (50초 경과시) |
|----------|-----------------|-----------------|
| 시뮬레이션 결과 | | |

표 13. 환기방식의 국내사례검토

| 구분 | 일반 지하철의 환기 방식 | 장대터널 지하철의 환기 방식 |
|------|------------------|----------------------------------|
| 환기방식 | 중앙급기 + 양단배기(정거장) | 배기(정거장) + 급기 + 배기 + 급기 + 배기(정거장) |
| 개요도 | | |
| 적용사례 | 대부분 지하철 | 신분당선(청계~ 판교 8km) |

표 14. 승강장 화재발생시 대피관련 설계기준

| 구분 | 허용기준 | 피 난 평 가 |
|--------------|---------|-----------------------------------------------|
| NFPA 130 | 4분 이내 | • 승강장으로 부터 대피시간 |
| | 6분 이내 | • 승강장의 가장 먼 지점에서 안전한 장소 |
| 홍콩 Metro | 4.5분 이내 | • 승강장에서 출구 통과 |
| 서울시 도시기반시설본부 | 4분 이내 | • 1차 안전구역까지 피난(승강장 탈출) |
| | 6분 이내 | • 2차 안전구역까지 피난(개찰구 진입) |
| ** 국토해양부 | 4분 이내 | • 승강장으로 부터 피난 |
| 적용 사례 | 6분 이내 | • 연기나 유독가스로 부터 안전한 외부출입구를 벗어나는 시간 |
| 도시철도건설규칙 | - | • 지하3층 이하 승강장으로 부터 외부로 직접 탈출 가능하도록 특별피난 계단 설치 |

*서울시 지하철 방재설계 기본방향 연구 (2002.8) **도시철도 정거장 및 환승, 편의시설 보완 설계지침 (2002.11)

의 면적과 적정 풍도크기 등을 검토해볼 필요가 있다.

2.4.4 환기방식의 국내사례검토

국내 대부분의 지하철은 양단 배기 중앙 급기방식으로 운영되고 있고, 현재 공사중인 신분당선(청계~판교 8km)은 약 2.5km 간격의 환기구를 설치하여 급배기 교대 환기방식으로 설계되었다. (표 13 참조)

2.4.5 검토의견

대심도 장대터널의 환기구간 간격은 환기측면 보다 방재측면에서의 결정된다. 즉, 환기적 측면을 검토한 결과 준고속차량이므로 본선내 교통환기력 효과가 상승되어 정거장 일부 부근 이외에는 자연환기로도 환기가 가능하다.

제연풍량이 환기풍량 보다 크므로 제연풍량 기준으로 본선 환기팬의 용량을 선정하는 것이 바람직한 것으로 검토되었다.

3. 승강장 대피계획

3.1 개요

일반적인 지하철의 경우 승강장의 심도는 약 30m이

나, 대심도 승강장인 경우 심도가 50m 이상이므로 화재 발생시 화재원으로부터 신속하고 안전한 탈출이 곤란하다. 그러므로 승객의 안전한 대피를 위하여 제연구역 및 특별피난 계단의 검토가 필요하다.

3.2 설계기준

승강장 화재 발생시 대피관련 설계기준을 표14에 나타내었다.

3.3 승강대피시설 검토

3.3.1 국내 지하철 심도 현황

최근 국내 지하철의 심도가 30m이상인 정거장은 12개 소이고, 부산지하철 3호선 구간의 만덕역이 76m로 가장 깊은 것으로 조사되었다. (그림 6 참조)

3.3.2 대심도 승강장 설계현황

30m이상의 정거장은 대부분 지하4층 이상으로서 2차 안전구역(개찰구)까지의 피난기준시간 6분을 초과하는 경우가 대부분이다. 2007년 국정감사에 의하면 서울지하철 264정거장중 46정거장이 6분을 초과하는 것으로 보고되었다.

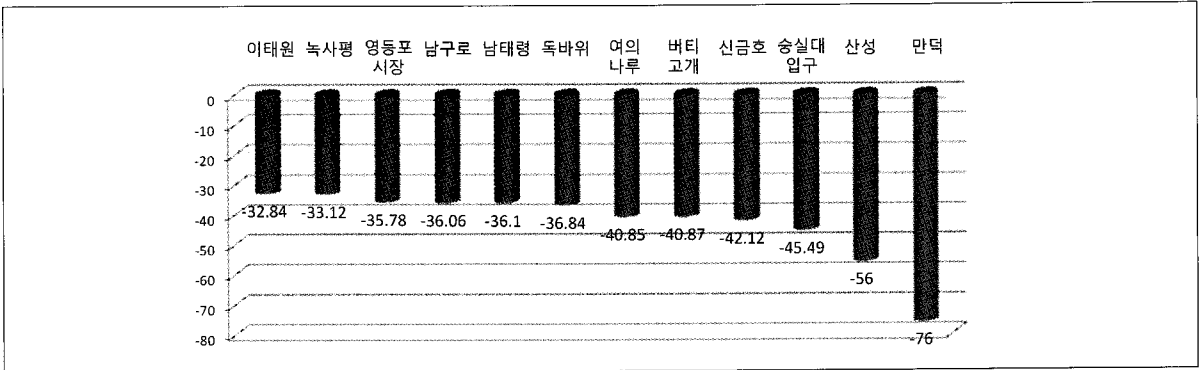


그림 6. 국내 지하철 심도현황

최근 설계되는 9호선, 신분당선, 소사-원시 등의 사업에서는 서울시 도시기반시설본부의 기준을 근거로 2차 안전구역까지의 피난기준시간 6분을 준수하나, 일부 대심도의 경우 2차 안전구역을 개찰구가 아닌 연기의 침입을 방지할 수 있는 제연구역을 안전구역으로 해석하고 있다.

3.3.3 검토의견

가) 안전구역

승강장위치가 지하 6층 또는 7층인 경우는 현실적으로 2차안전구역인 개찰구까지 6분 이내 진입은 사실상 곤란하다. 그러므로 NFPA 130기준을 준용하여 화재발생지

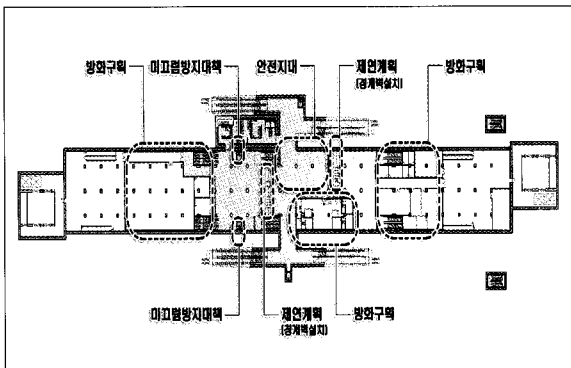


그림 7. 안전구역 계획

점으로부터 6분 이내 탈출이 가능한 안전구역에 그림 7과 같이 연기차단설비, 가압설비, 제연설비 집중 설치하여 연기로부터 인명피해가 최소화되도록 계획한다.

나) 특별피난계단

지하3층 이하 승강장으로부터 외부로 직접 탈출 가능하도록 그림 8과 같이 전실에 가압시설을 설치하여 연기침입이 차단되는 특별피난 계단을 계획한다.

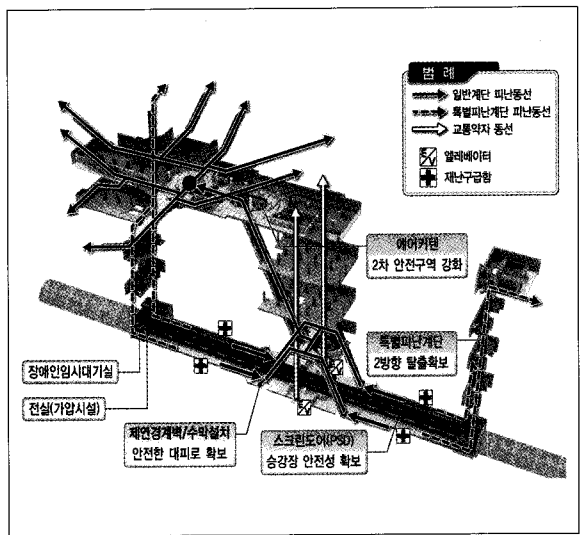


그림 8. 특별피난계단 계획

4. 결론

방재 및 환기측면에서 본선터널의 환기구(대피로) 간격을 검토한 결과 2.5km 간격이 적정하다. 그렇지만, 향후 터널구조물, 차량제원, 운영조건 등의 세부적인 설계조건이 확정되면, 환기구 간격뿐만 아니라 환기구 크기, 입출구 방향, 관련 방재설비 등 좀 더 종합적인 검토가 필요하다.

또한, 대심도 정거장(승강장)의 대피시설물은 6분 이내 탈출이 가능한 거리에 제연이 가능한 안전구역 및 특별피난계단을 계획하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 국토해양부, 2005, "철도시설 안전기준에 관한 규칙"
2. 국토해양부, 2008, "도시철도 건설규칙"
3. 국토해양부, 2006, "철도시설 안전세부기준"
4. 국토해양부, 2005, "고속철도 터널방재기준"
5. An International Codes and Standards Organization, 2007, "NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems"
6. 국토해양부, 2002, "도시철도 정거장 및 환승·편의시설 보완 설계지침"
7. Backman, Johan., 2002, "Railway Safety - Risks and Economics", Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Planning.
8. 전덕찬 외, 2004, "정량적 화재위험성평가(QRA) 기법을 적용한 터널방재 설계사례", 한국지반공학회 창립 20주년 기념 지반구조물 설계·시공사례집
9. 김원국, 2003, "터널 방재설계 최적화에 관한 연구", 대한토목학회, 터널시공기술향상 대토론회 논문집
10. ISO/TS 13571, 2002, "Life - threatening components of fire Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data"
11. 김도식 외, 2005, "QRA분석을 이용한 철도터널 방재설계 사례" 한국암반공학회, 학술발표회
12. 김동현 외, 2006, "QRA에 의한 철도터널 방재 안전성 평가" 한국철도학회, 학술발표회