

# 분당선 한강 하저터널의 방재시스템

## Preventing disaster system of the subaqueous tunnel under the Han river in the Bundang railway

김용일\*, 황니연\*\*, 유영훈\*\*\*, 지홍년\*\*\*\*, 장성욱\*\*\*\*\*, 김동현\*\*\*\*\*  
Yong Il Kim, Nak Yeon Hwang, Young Hoon Yoon, Hong Keun Jie, Sung Wook Jang, Dong Hyun Kim

### ABSTRACT

As use of tunnels and subways increase there also are accidents proportionate to it. Daegu Subway Station fire, Hongjimun tunnel fire led people to be conscious of disaster protection and as a result, there is a trend to adopt standards for fire protection. Accordingly, this thesis is focused on investigating various fire and water protection related issues for subaqueous tunnel under Han river.

The thesis developed evacuation and disaster prevention plan as fire level increases and have identified the suitability of disaster prevention through evacuation and fire simulation, countermeasure of a water leakage during construction and operation considering the subaqueous tunnel. And we selected EPB shield TBM equipment considering the ground condition and effect of boring hole, and accomplished reasonable water protection design through setting goals using event-tree method, as well as examining model test of boring hole and flooding in heavy rain.

Also included structured total system consist of water leakage sensing system, water protection gate, pumping system and fire protection system to respond systematically in emergency.

### 1. 서론

최근 터널과 지하철을 이용한 교통량이 증가하고 있으며, 이와 비례하여 터널내 사고 발생사태도 증가하고 있는 추세이다. 특히 대구지하철 화재사고 등 대형참사 이후 방재의식이 향상되어 방재기준 정립 및 법제화가 급속도로 추진되고 있다. 본 고에서는 최근의 이러한 경향을 반영하여, 한강 하저구간을 통과하는 복선전철 노반선철공사에 대한 설계시 요구되는 각종 방재관련 사항들을 검토하는 것을 목적으로 하였으며, 이를 위해 화재와 수해 등의 재해사항을 공사중과 운영중으로 구분하여 발생가능한 모든 사항들에 대해 종합적이고 체계적인 방재시스템을 구축하고자 하였다.

국내의 방재설계기준 검토, 국내의 화재사례 분석과 여론조사를 통한 인식조사로부터 화재시 승객의 행동양식을 분석하여 화재감지시설, 소화시설, 피난유도시설물등의 시설물 배치계획을 수립하였다. 화재규모 추정 및 방재설비의 적정성 검증을 위한 다양한 피난시나리오를 작성하여 피난시뮬레이션을 수행하였다.

\* (주)대우건설 토목기술1팀 차장, 공학박사, 정회원

\*\* (주)대우건설 상무, 정회원

\*\*\* (주)대우건설 부장, 정회원

\*\*\*\* (주)대우건설 부장, 정회원

\*\*\*\*\* 서울산업대 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 정회원

\*\*\*\*\* (주)삼보기술단 부장, 공학박사, 정회원

또한, 화재시용래이션을 수행하여 피난내 온도 및 연기 거동을 파악하였고, 이를 바탕으로 방재시설물의 설치적정성 및 승계의 피난안전성을 검증하여 최악의 상황에서도 승계의 안전하고 신속한 대피와 구조물의 안정성 확보가 가능하도록 계획하였다. 특히 하지 및 해지 디닝 시공의 경우, 안정성 확보 측면에서 월드타워공법이 주로 적용되고 있다. 일반적으로 월드타워의 수평대책은 알드장벽의 보강 및 수압저지능력과 새그먼트의 방수성능, 말린 및 도당구의 침수 대책, 침수 발생시 대처 시나리오, 구조물의 유지관리 등의 항목으로 구성되며, 이에 대한 수행가능성 및 대책방안을 수립하였다.

본당선 환경 하저터널의 현황은 다음 그림과 같이 총연장 1,660m의 3중구 중 피난연락용 2개소만 포함된 권드TRM 연장이 845.5m이며, 권드장비 전용입 계획은 환기구 #4, #5를 이용하였다.



그림 1. 본당선 환경하저통과구간 현황도

## 2. 방재선계기준 및 사례분석

국·내외의 화재 및 수해사례를 조사·분석하여 본 과업의 선계시 문제점을 파악하였으며, 국내·외 선계기준을 검토하여 방재계획서 기준으로 적용하였다.

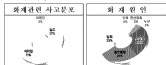
### 2.1 사고유형분석 및 사례분석

1971년~1997년까지 보고된 화재의 원도 또는 지하화 된터사고 175건 중 48%가 화재로 발원됨을 보였으며, 이로부터 화재 예방 및 피난의 중요성을 알 수 있다.

표 1. 터널내 사고유형

• 터널사고의 분포(1971~1997)

운송형태	지하화	원도	터락인	합계
총사고	126	47	3	176
화재관련	58	26	1	85



#### (1) 화재 사례분석

프랑스 국철종도 화재(1971), 일본영단 지하화(1968), 일본 JR 북쪽터널 화재(1972), 미국 샌프란시스코만 해지터널 화재(1979), 몽골알타이 화재(1999), 고라트 터널의 화재(2001), 대구시북쪽 암사(2001), 홍지문터널 화재(2003) 등 수많은 터널내의 화재사고로 인하여 인명과 재산피해가 발생했다. 이러한 대조적으로 1999년 발생한 철물해협 유로터널의 화재사고에서는 인명피해가 발생하지 않았다. 이는 화재발생시 효과적으로 화재를 감지할 수 있는 연기감지시스템과 선행화재감지기가 이상으로 화재를 감지하고 있으며, 375m 간격으로 설치된 피난연락용으로 승객이 신속하게 대피할 수 있도록 설계단계에서부터 계획하였기 때문이다. 또한, 신속하고 효율적인 화재진압을 위하여 연

결중수관 등의 방제시설과 시스템이 효율적으로 운영되었기 때문으로 보고되고 있다. 이러한 화재 사례를 조사하여 화재 예방과 초기진압, 승객의 유도에 초점을 두고 방제시설물을 계획하였으며, 방제시스템구축에 중점을 두었다.

## (2) 수해사례분석

표 2와 3에서 국내·외 수해사례 조사결과를 나타내었다. 검토결과 시공중에는 예측치 못한 불량의 지반이 출현하여 수해가 발생하였으며 운영중에는 경계장과 환기구를 통한 월류로 터널이 침수되는 피해가 주로 발생하였다. 따라서 단층대, 파쇄대 등의 지반조건에 대한 정확한 파악과 한강하저구간의 고수압조건에 대한 즉각적 대처가 무엇보다 중요하다. 또한, 김중호우시 정거장 출입구 높이, 환기구의 환기탑높이의 정확한 산정이 운영중 수해피해를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표. 2 시공중 수해 사례

구분	개요	지반조건	내용	원인분석	
국내	5-18공구 (원강통과구간)	NATM (발파, 기계)	호상축운로 편마암, 단층주재	• 시공중 봉라, 홍수시 침수 • 피난연막재 : 옥연중 파쇄대에 주재	• 한강 홍수위 예측미비 • 단층대 및 지반조건 예측 미비
	광주도시철도	린드 (EPB)	화강편마암 화강암	• 침착부 누수과다 • 예측치 못한 암반출현	• 발전·도단부 세그먼트 방수 불량 • 연결제 선정의 문제점
해외	덴마크 Big belf해빙	린드 (Slurry)	연약층 석회암 등	• 66m의 수압작용 • 3~8m <sup>3</sup> /sec 해수유입으로 침수	• 고수압 대처 미비 • 장비운영능력 저하
	세이칸터널	NATM 선진도개	퇴적암 안산암	• 240m 해저에 시공 • 80m <sup>3</sup> /min 해수유입으로 터널 침수	• 지점이상대 예측미비 • 착수공법의 부재

표. 3 운영중 수해사례

구분	사고시기	노선	침수 피해내용	원인분석
국내	1998. 5. (인강우량 77mm)	7호선	• 중랑천의 임시제방 범람에 따른 침수로 도봉산 ~ 건대입구 구간 운행중단	• 월류로 인한 침수 • 입·출구부 수방 대책 미비 • 펌프용량 부족
		2호선	• 인근 6호선 공사 현장을 통한 합경역 침수로 임시운행 중단	
해외	1998. 8. (인강우량 316mm)	3호선	• 도로침수로 출입구와 환기구를 통한 물 유입, 임시운행 중단	
		2호선	• 분당선 3공구 공사장 연결통로의 돌막이벽 붕괴에 따른 선릉역 의 침수 발생	
		3호선	• 출입구로 노면수 유입으로 인한 대치역 침수로 도곡~수서 구간 임시 운행 중단	
2001. 7. (인강우량 310.1mm)	7호선	• 인접전철연결 통로로 우수 유입되어 고속터미널역사 침수로 청담~내방구간 임시 운행중단		

## 2.2 여론조사를 통한 설계변형

여론조사 전문기관에 의뢰하여 지하철 이용승객 300명, 지역주민100명과 유지보수원등의 전문가 50명을 대상으로 면접조사를 실시하여 비상시 일반인의 방제에 대한 인식, 행동양식 등을 검토하였으며 승객입장을 고려한 방제계획을 수립하였다.

표 4. 주요 여론조사 결과

수혜방지	화재예방	승객대피	연기 확산
한강하저구간으로 침수·누수에 대한 우려	화재·사고 예방에 대한 인식 고취	비상사태시 대처 요령에 대한 인지 부족	피난 및 알람을 위한 개인 선미인식 확산

### 2.3 설계 기준 검토

#### (1) 화재기준

국·내외 화재관련 설비 기준을 조사하여 방재시설문 설치 및 배치시 기준자료로 활용하였다.

표 5. 국내·외 방재설비 기준

구분	적용항목	상세기준내용	
국내	서울지하철	제연설비 제연중속 2.5m/s 이상, 분신 환기팬 검용	
	정거장 관련	외부출입구, 계단, 승강장 관련 기준제시	
해외	NFPA 130 (미국)	제연설비	대피시 분신 환기팬 기류제어, 250°C에서 1시간 이상 작동
		피난 연약경	244m 이하 간격, 1.5시간 이상 견딜 수 있는 방화문 설치
		비상탈출구	381m 이하 간격
		연립송수관	직경φ 100mm 이상의 견식, 모든 지하층에 설치
	비상조명	비상시 2.60lux 이상	
	일본	터널조명	1,000m 이상 터널에서 41m 간격으로 설치
		유도표시	최대 100m 간격
	영국	분신설비	경보·분신설비 250m 이내 설치, 불연성 진선 사용
		피난통로	터널내 피난통로 설치
		수적구	3,000m 간격으로 설치, 경제성 고려

#### (2) 수방기준

일본터널협회와 서울지하철 설계기준을 검토(표 6~8)하여 터널내 허용누수량을 산정하도록 하였다.

표 6. 터널내 허용누수량

구분	허용누수량 (m <sup>3</sup> /km/min)	비고
선도터널	0.5	일본터널협회(1999)
환기구구간	2.0	
정거장구간	2.0	서울지하철 설계기준 (1989)
NATM구간	3.5	

표 7. 터널내 비상시 수위기준

구분	수위 (cm)	비고
주요단계	3	일본터널협회 (1999) ※경보단계·사망이 걸기 힘든 수위
경보단계	30	

표 8. 터널내 비상시 수위기준 (문을 열 수 없는 수위)

구분	수위 (cm)	비고
안에서 밖	26	일본터널협회(1999)
밖에서 안	37	

### 3. 열차화재시 피난 및 대응 계획

대중지하철 화재사건 이후, 지하철 등에서의 안전의식이 향상되고 있어 설계단계에서부터 화재에 방 및 대처에 대한 고려가 필요하다. 따라서 국내의 설계기준, 여론조사 분석, 화재사례검토를 통한 문제점 분석과 사고예방 및 승객의 안전한 대피를 위한 최상의 계획을 수립하였다. 또한 한강하저를 통과하는 터널이라는 공간적인 특수성을 고려하였으며, fail-safe 개념을 도입하여 화재 대응 단계별 시설물 계획을 수립함으로써 2중 3중의 안전장치로 승객의 안전을 확보할 수 있도록 하였다.

#### 3.1 단계별 대응계획

화재 발전에 따라 사전예방단계, 발화단계, 진압단계로 구분할 수 있다. 사전예방단계에는 사고발생시 안전시설물, 불연성 전기재료 등의 화재예방설비 설치, 방재설비 일상점검과 긴급구난관련 정기훈련 등이 있다. 발화단계는 화재발생 시점에서 2분 사이로 화재감지와 초기 진압이 이루어지는 단계이다. 대피단계에서는 2~6분 사이로 병원, 경찰서, 소방서 등의 비상연락시스템 가동으로 본격적인 화재진압과 부상자 호송 등이 이루어진다.

국내 철도관련 방재시설규정은 동일한 규모의 방재설비 기준을 제시하고 있으므로 방재시설은 국내·외의 통상적 설치규정에 근거하여 건설교통부 기준에 적합한 시설로 계획하였으며, 엄격한 기준으로 알려진 미국의 NFPA 130 기준을 준용하였다.

##### 3.1.1 사전예방 및 화재감지 단계

모든 재해에 대한 최선의 대처방안은 예방이다. 특히 화재의 경우 지속적인 유지관리와 발생 가능한 원인을 최소화함으로써 화재류 예방할 수 있으며, 화재발생시 신속한 조기 발견으로 대형화재로의 발전을 사전에 차단함으로써 피해를 최소화할 수 있다. 국내·외의 화재사례 및 여론 조사 결과 등을 반영하여 화재예방을 위한 절연성케이블, CCTV 등을 설치하였으며, 선형화재감지기를 설치하여 화재발생여부와 발생위치를 신속하게 파악할 수 있도록 하였다.

##### 3.1.2 발화단계 (승객대피 및 유도단계)

지하터널이라는 폐쇄적인 공간적 특성으로 인하여 비상시 승객은 방향감각을 상실하고 심리적 공황상태에 놓이게 되어 더욱 큰 피해를 초래할 수 있다. 따라서 이러한 피해를 줄이기 위하여 여론조사 등에서 나타난 바와 같이 유도음부침별형 유도등, 정전시에도 작동이 가능한 발광띠, 안전 손잡이 등을 설치하였다. 또한, 열차출입문 높이의 대피통로(walk-way), 환기구 피난계단과 피난연락경 설치로 피난시간을 단축시켜 승객의 피난안전성을 더욱 향상시켰다.

##### 3.1.3 화재 진압단계

화재의 초기진압을 위하여 소화기를, 본격진압을 위하여 연결수구구를 계획하였으며, 환기설의 파연로 인한 화재진압을 위하여 자동화산소화기를 설치하였다.

본 과업에 적용된 주요 방재시설물은 표 9와 같다.

표 9. 적용된 방제시설물

구분	장치	설치구간	특성
화재감지 시설	연형화재감지기	터널 진구간	• 화재발생 여부 및 위치 파악, 화재진행방향
	CCTV	400m간격, 중요구간설치	• 화재, 누수 등 비상사태 발생 감지, 연구관 상시 감시
소화 시설	연결송수관	터널 전연장 설치	• 50m간격 방수구 설치; 사각지대 해소
	소화기	진동차내 소화기 비치	• 소기진압용 소화기
	자동화산소화기	환기채널 내 설치	• 모터 과열로 인한 화재 차단 기능
유도 시설	유도음부 전연장 유도등	설치간격 : 100m	• 음향, 빛에 의한 유도, 대피방향 및 거리 표시
	발광 띠	분선 전연장에 걸쳐 설치	• 연속적인 승객의 피난유도, 전원 불필요
	안전 손잡이	터널 진구간	• 승객 유도 기능 겸비로 승객의 피난 안정 향상

3.2 연차 출입문 높이의 피난동요(Walk-way) 및 환기구내 피난계단

화재발생시 심리적 공포 상태에서 연차로부터의 탈출 및 외부 탈출구와의 접속을 수월하게 하기 위하여 연차출입문 높이의 피난동요를 설치하였다. 피난동요의 설치로 터널내 피난연락경 및 환기구 피난계단과 카운터스루를 접속이 가능하여 대피시간이 단축되고, 어린이, 노약자, 장애인 등의 연차탈출이 용이하여 인명피해를 최소화시킬 수 있을 것으로 기대되었다. 피난동요 설치에 따른 피난 시간을 비교해 본 결과 하차완료시간이 4분이상 단축되는 것으로 나타나 피난안전성이 크게 향상되었다.

표 10. 피난동요(Walk-way) 적정성 평가를 위한 시뮬레이션

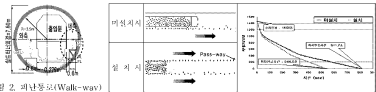


그림 2. 피난동요(Walk-way)

신속한 지상대피로 인명피해를 최소화하기 위하여 환기구내 피난계단을 설치하였다. 피난계단의 원칙으로 인명구조와 화재진압시 소방대원의 접근이 수월해짐과 동시에 정거장 화재시 동선이 다양해져 인명피해가 최소화될 수 있다. 이러한 점을 감안하여 피난계단의 설치는 물론이려나와 피난계단 전선내 계연설비를 설치하여 안전한 탈출환경을 조성하였다.

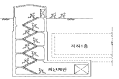
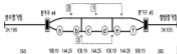


그림 3. 환기구내 피난계단

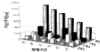
3.3 피난연락경 계획

3.3.1 피난연락경 개소

터널구간 연장이 845.5m로 화재 발생시 피난동선이 길어 승객의 안전확보가 어려울 것으로 판단하여 그림 4와 같이 피난연락경 설치개소(0, 1, 2, 3 개소) 다양한 위치에 대하여 피난시간을 검토하였다. 검토결과 피난연락경의 설치개소를 증가시키면 화재발생시 피난안전성은 증가되나 짐승부의 증가로 수해에 대한 환경성은 감소된다고 할 수 있다. 대난거리는 피난연락경을 3개소 설치한 경우가 2개소인 경우보다 약 72m의 피난거리가 단축되는 것으로 나타났다. 따라서 피난연락경이 2개소를 초과하는 경우 피난시간의 단축효과가 미미하고 수해위험성이 증가하므로 2개소를 적용하는 것이 적절하다고 판단하였다.



(a) 검토조건



(b) 검토결과

그림 4. 피난연락경 취소 결정

### 3.3.2 피난연락경 관계

과거의 피난연락경 관리 산정을 위하여 국내의 설계기준을 분석하였고, 피난시용레이션을 수행하였다. 설계기준 검토결과 지하철 단계로 주로 적용하는 미국에 NFPA 130기준(244m이하)보다 엄격한 200m를 적용하였다. 시뮬레이션 결과에서도 재연령이 가능하지 않을 경우 안전하게 피난이 가능한 거리가 230m고(그림 5) 검토되어 피난연락경 간격은 200m가 적절할 것으로 판단되었다.

피난연락경에 설치되는 방화문은 기밀성, 내압성, 내열성이 우수하고 병목에서의 혼란을 줄일 수 있는 방화문 형식으로 NFPA 130 기준인 2.4m(W) × 2.1m(H) 이상, 1.5시간 이상의 내화성을 충족시켜야 할 수 있는 슬라이딩식 방화문을 적용하였다.

표 11. 외국 도도타입의 적용기준 및 사례

구분	국내입지순기(m)	적용기준		적용대상
		대안용	좌상용	
미국	NFPA 302	300		300m 이상
	NFPA 130	244		
BAHT (독일)	300	900		400m 이상
RPT (스위스)	300	900		
실제요청 (일본)	250			230m 이상
노드웨이	250	1000~2000		
PROPOSAL(EU)	300	1000		300m 이상

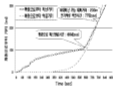


그림 5. 시뮬레이션 결과

## 3.4 비상시 대피 시나리오

도시철도 타원은 대중교통수단으로서 사교시 승객의 인명피해가 크며 도도타입과는 다르게 지하 계통공간내에 있으므로 화재확산 이전에 승객대피가 최우선으로 이루어져야 한다. 즉, 터널내역속이 커서 연기 및 열기류의 상승속도가 빠르며 연소 및 복사열의 2차적 확산으로 인명피해가 큰 사고 특성을 갖고 있으므로 적자 역 사이를 하나의 재연구역으로 설정하고 배연하여 대피와 화재진압을 위한 환경확보가 필요하다.

### 3.4.1 시나리오 구성

화재사 직격한 대응방안을 마련하기 위하여 화재발발, 연착에 의한 터널내의 공기 온도, 피난 인원 등을 합리적인 방법으로 산정하여 화재 및 피난시용레이션을 기존 조건으로 적용하였다. 과업 구간내의 공간선형 승차 공간적 특성을 고려하여 다양한 화재 시나리오를 구성하였다. 작성된 시나리오를 바탕으로 승객과 사선물의 피해를 최소화하기 위하여 사고발생 위치별로 승객의 대피 안전성을 검토하였다. 또한, 피난 시용레이션을 통한 방재 시설물의 적정성, 효과 등을 검증하여 시설물 설치에 적정성을 검증하였으며, 최악의 위치에서 화재시용레이션을 수행하여 피난안전성을 상세히 검토하였다. 이로써 재연령 가능시점 및 피난동선 등을 제안하여 화재사 승객의 안전을 도모할 수 있도록 계획하였다.

## (1)궤도조건 결정

### ① 화재규모

Fareka 화재실험을 기초로 하여 열차화재시 화재발열량을 산정하였다. 독일의 지하철 차량에 대한 실험결과, 알루미늄 차체인 경우 최대발열량은 35MW로 나타났으나 이는 스테인레스 차체를 사용하는 국내 실험과는 다르다. 따라서 열차차량에 대한 화재실험결과 독일 IC Train에 대한 15MW를 적용하여 화재 및 피난시뮬레이션에 적용하여 합리적인 방재설계가 되도록 하였다.

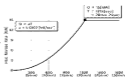


그림 6. 화재발전 양상

### ② 열차정지시 공기의 관성력

열차가 정지하여도 관성에 의해 터널내 기류는 존재하며, 터널구간에서 정지장보다 뚜렷한 현상이 나타난다. 이 관성력은 승객의 초기대피에 영향을 미치므로 1차원 시뮬레이션에 의한 공기의 관성력을 검토하였다.

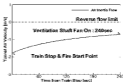


그림 7. 열차의 공기 관성력

### ③ 승객 대피 인원 산정

불발현 설계시 교통영향평가 등의 자료를 근거로 오전 출근시간대의 궤도교통량을 산정하였으며 NFPA 130 기준으로 대피인원을 합리적으로 산정하였다. 즉, NFPA 130에서 제안한 혼잡율을 적용하여 승하차 인원에 기반한 탑승인원을 다음과 같이 산정하였다.

$$17,519(\text{오전혼잡시 교통량/hr}) / 24(\text{운행열차수/hr}) \times 200\% \approx 1,460\text{명}$$

## 3.4.2 화재구역별 대피 시나리오

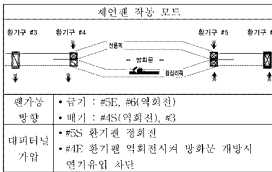
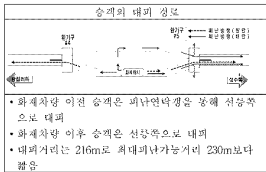
환경각도구간의 기하학적 형상과 중단구대가 대적인 점을 고려하여 화재 발생위치 3곳을 가정하여 시나리오를 작성하였다. 시나리오를 바탕으로 화재시 승객의 피난방향과 제연방안을 제안하였으며 각 CASE별 피난시간을 검토하여 승객의 안전 및 방재선비의 적정성을 검증하였다. 구성된 시나리오와 상황별 대처방안은 다음과 같다.

### ① CASE 1 : 환기구 #4와 피난연락경 #1 사이에서 화재발생

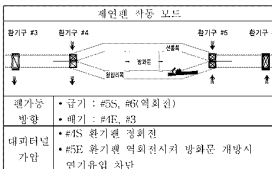
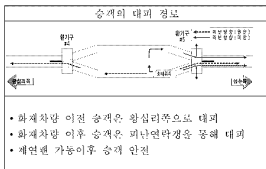
승객의 대피 경로	제연팬 작동 모드
<ul style="list-style-type: none"> <li>화재차량 이전 승객은 환기구쪽으로 대피</li> <li>화재차량 이후 승객은 피난연락경을 통해 대피</li> <li>대피거리는 180m로 최대피난가능거리 230m보다 짧음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단기 : #3 역회전 #4 역회전</li> <li>비기 : #5S(역회전), #6</li> </ul>
대피터널 기압	<ul style="list-style-type: none"> <li>#4S 환기팬 정회전</li> <li>#5E 환기팬 역회전시켜 방화문 개방시 연기유입 차단</li> </ul>



## ② CASE 2 : 피난연락경 #1과 #2 사이에서 화재 발생



## ③ CASE 3 : 피난연락경 #2와 환기구 #5 사이에서 화재 발생



본선부 피난동로 및 피난연락경 설치로 그렇지 않은 경우에 비해 승객의 하차 및 대피가 원활하며 총대피시간이 평균 22% 감소되고, 주정차위치에 대한 피난대피 시뮬레이션 분석 결과 하차시간은 평균 30.34% 감소되었다. 따라서 피난연락경, 피난동로, 피난계단 등의 설치로 화재발생시 승객의 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

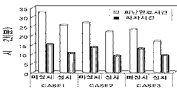


그림 8. 피난시간 검토결과

## 3.5 화재 시뮬레이션에 의한 방재계획 적정성 검토

시나리오별 검토결과, CASE 3의 피난완료 시간이 가장 빠르나, 이는 열 및 연기유동을 감안하지 않은 결과이다. 일반적으로 동일 터널내에서의 화재시 종단경사가 급할수록 연기의 역류속도가 빠른 데 이 위치는 연기역류방향이 제연방향과 반대이며 종단경사(29%)도 급하므로 과열구간 중 가장 위험한 것으로 판단되어 상세검토를 수행하였다. 터널내에서 화재발생시 방재용 환기설비를 가동한 후의 터널내부온도, CO 및 연기 농도분포 분석하여 방재용 환기설비 성능의 적정성과 터널이용자의 안전한 대피 가능여부를 검토하였다.

### 3.5.1 검토조건

화재시뮬레이션에 대한 검토기준이 미비하므로 CO, 연기 등의 농도에 관계없이 피난자가 연기에 접촉되는 경우를 기준으로 검토를 수행하였다. 주요 검토내용으로는 터널 종단경사, 피난거리를 고려한 최악의 조건 도출, 열차정차지점에 따른 피난시뮬레이션 수행 및 이를 통한 제연랜 가동시점 검토 등이다.

표 12. 화재시유래이션 검토조건

<p>해서프로그램</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· CFD 시뮬레이션 : FLUENT V6.1</li> <li>· 피난대피 시뮬레이션 : SIMULEX</li> </ul>	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

3.5.2 재연설비 비가동시 열·연기 기동 분석

열차에서 화재발생시 초기위험성은 어느 차장이건 내포하고 있으며, 재연선은 연기역류로 인한 2차사고 방지 및 연기제출을 위해 반드시 작동되어야 한다. 피난사나리오 작성시에 승객의 최대인원 대피를 관리자가 승객의 초기 피난방향을 인정한 후 재연선을 가동하도록 해야 한다.

화재저절 후방으로 연기류가 발생하는 시점은 화재발생후 6분 내외이므로 재연운전은 가류형성을 감안하여 4분내에 시작되어야 한다. 만약, 환기기 비가동시 화재피난자가 연기류의 수위를 받지 않고 태워할 수 있는 최대거리가 98m로 산출되므로 피난연락경 이진 위치에서 열차가 생차할 경우 반드시 배연용 환기기 가동이 필요하다.

정차 6분후 화재차량 앞쪽 승객은 위험할 수 있으나 열차선두에서 피난연락경까지의 거리가 20m 정도로 극히 짧아 신속대피가 가능하므로 안전에 이상이 없을 것으로 예상되며, 정차 6분후 재연팬 가동으로 모든 승객의 안전회복이 가능하다. 열유동 분석결과 정차 3분후 화재 초기단계로 발열량이 크지않아 온도상승이 작으며, 정차 10분후 화재정상이 발전중이며 연기류가 확산하나 정차 17분후 재연팬에 의한 기류가 충분하여 역류는 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

화재발생구간이 단선으로 난연성이 작아 화재초기 연기류의 확산이 급격하게 발생하나, 피난연락경의 설치로 대피승객의 피해를 최소화할 수 있으며, 환기기 가동시 반대편 터널의 가압운전으로 인하여 신선공기를 공급함으로써 재연성능 및 승객 대피 효율을 동시에 향상시킬 수 있도록 재연 및 가압계획을 수립하였다.

표 13. 인산화탄소 및 열유동 검토결과

구분	인산화탄소	열유동
정차		
17분후		

표 14. 최악의 위치에 대한 피난안전성 검토결과

시간	구분	상수방향	청남방향
3분	연기이동	201.6m	8.5m
	승객이동	하차중	하차중
	위험여부	다소 위험	다소 위험
10분	연기이동	환기구 #4 배기	역류없음
	승객이동	피난완료(선동쪽)	163.3m
	위험여부	안전	안전
17분	연기이동	환기구 #4 배기	역류없음
	승객이동	피난완료(선동쪽)	피난완료(청남역)
	위험여부	안전	안전

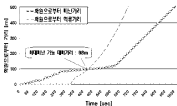


그림 9. 피난자와 연기류

이상과 같이 회계에 대한 안전확보를 위하여 국내·외 기준, 터널내 화재사례분석, 일반인과 전문가의 여론 조사 등을 통하여 화재발생 원인, 비상시 일반인의 행동양식을 파악하여 이에 적합한 방재시설을 계획하였다. 또한, 본 과업구간에 적합한 피난시나리오를 구성하여 각각의 경우에 대한 피난 및 재연계획을 수립하였으며, 피난의 위치에 대한 화재시물레이션을 수행하여 방재설비의 적정성을 검증하였고 승객의 안전을 다시 한번 확인하였다.

#### 4. 수방설계

본 구간은 한강하저를 통과하는 복수구간으로 시공중은 물론 운영중에도 항상 침수위험이 존재하고 있다. 시공중에 발생가능한 위험으로는 한강의 풍부한 수원의 원부가 이루어지는 현상으로는 단층대, 파쇄대 등 지반상태가 불량하거나 기존의 시추공과 조우하게 될 경우 발생할 것으로 판단된다. 운영중에는 최근 빈번하게 발생하고 있는 이상호우 등의 사유로 개착구조물인 환기구, 정거장을 통해 지표수가 유입되는 경우를 생각할 수 있다. 즉, 시공중에는 지반조건, 굴착장비 등의 문제로 침수가 가능하며, 운영중에는 집중호우로 인한 지표수 유입, 세그먼트 누수, 절속부 누수가 발생가능한 문제이다. 따라서 본 고에서는 앞에서 제시된 각각의 문제점에 대한 상세검토를 통하여 적절한 대책을 수립하였다. 또한 운영중 누수·침수를 감지할 수 있는 누수감지시스템을 구축하였으며 방수문제어 및 배수시스템과 연계하여 누수·침수시 방재대책을 수립하였다.

#### 4.1 위험구역 및 위험요소 평가

##### 4.1.1 지반조사를 통한 위험구간 산정

한강하저구간의 정확한 지반조건을 평가하기 위하여 방향저어시추(DCD), 3D 전기비저항탐사, 하상단파사 단층과 탐사 등을 수행하였다. 지반조사결과, 한강 제방부분의 육상과 하상이 만나는 부분에서 단층대, 연약대가 발달하여 돌발 용수로 인한 문제발생 가능성(위험구간)이 있으며, 하저구간 굴착시에는 기존 시추공과 조우할 경우 침수 가능성이 존재하는 것으로 나타났다(주의구간).

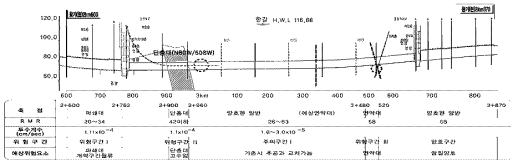


그림 10. 과업구간 위험구간의 선정

지반조사 결과를 바탕으로 11개 단면에 대하여 콘블럭해석을 수행하여 막장에 작용하는 침투력을 산정하였다. 콘블럭 해석은 막장전방에 침투수압이 작용할 경우의 한계평형해석법으로서, 설계에서는 Leca and Panet(1988)에 의해 제안된 이중콘블럭 이론을 적용하였으며, 모형실험을 통해 산정된 결과와 비교·검토를 수행하였고, 위험도 분석에 적용되었다. 침투구간 침투력변에 따른 위험구간 선정결과는 아래와 같다.



그림 11. 원통목 해석

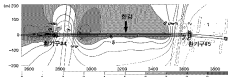


그림 12. 터널통과구간 용수가능성 평가

표 15. 원통목 해석에 의한 섀드터널구간 침투력 산정결과

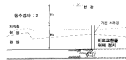
평가기준(경수)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Shield 구간 침투력 (ton/m <sup>2</sup> )	6.5 이하	6.5 6.80	6.80 7.28	7.28 7.67	7.67 8.06	8.06 8.44	8.44 8.83	8.83 9.22	9.22 9.61	9.61 10	10 이상
실제현황		⇒ 용수안전구간					⇒ 굴진시 위험구간(중경반리)으로 선정				

#### 4.1.2 기존 시추공 영향 평가

##### (1) 수리모형시험

당초설계(1991) 및 원안설계(2003)시 하상 시추조사 후 배양처리를 수행하지 않은 것으로 파악되며, 오랜시간 경과로 경화된 시추공 위치 파악이 곤란할 문제점이 있다. 사공사 자연 퇴적된 물질들에 의해 채워진 시추공이 터널과 교차시, 터널침수 등 심각한 문제를 유발할 소지가 있는 것으로 판단하였으며, 이 문제를 위한 대책을 수립하기 위해 시추공 영향 평가를 위한 수리모형시험을 수행하였다. 시험방법은 시추공과 터널교차부 비교교란 등으로 정지된 경우를 모사하였으며, 터널과 교차시 시추공내 퇴적을 유입 가능성과 시추공을 통한 유입량을 측정하였다.

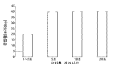
시추공을 통한 강물의 유입여부에 대한 검토결과, 퇴적물의 저항력은 0.351 tonf, 강물의 원주력과 퇴적물의 유효공압은 0.499 tonf로 나타났다. 따라서 저항력보다 하향방향의 원주력이 커 시추공과 터널이 조우하면 즉시 강물은 터널내로 유입될 것이라고 예측할 수 있다.



(a) 수리모형시험 개요



(b) 수리모형 시험용 모형보조



(c) 유입수량 변화

그림 13. 수리모형 시험

위의 검토결과와 같이 모형실험에서도 가세추공과 교차하는 즉시 토사 및 강물이 유입되는 것을 관찰할 수 있었으며, 퇴적물 유입후 유입수량은 40.08m<sup>3</sup>/day가 발생하였다. 이는 Manning 공식에 의한 예측 유입수량인 36.54m<sup>3</sup>/day와 유사한 값이다. 따라서 실제 유입수량 예측을 위해서 Manning 공식을 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. Manning 공식으로 실제유입수량을 예측한 결과 3,490m<sup>3</sup>/day로 시추공과 조우하면 터널침수는 불가피한 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요할 것으로 검토되었다.

## (2) 3차원 지하수 거동해석을 통한 시추공 영향 예측

다양한 지반 조건에 대하여 티널 굴진에 따른 시추공 영향 및 지하수 거동을 검토하기 위하여 3차원 지하수유동 범용프로그램인 『Visual-Modflow v2.8.2』를 적용하여 시추공과 조우하였을 경우에 대해 검토하였다. 해석결과 시추공에 가까워짐에 따라 유입량이 소폭 증가하고, 교차시 유입량이 대폭 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 지반이 불량한 경우에는 큰 변화를 나타낼 수 있었다.

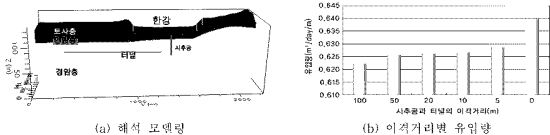


그림 14. 3차원 지하수 거동해석

수리모형시험결과 시추공과 터널이 교차한 상황에서 비트교환 등의 이유로 작업이 중지될 경우 기존 시추공을 통해 토사 유입 및 다량의 강물이 유입될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 3차원 지하수해석결과에서도 시추공에 근접함에 따라 터널내 유입량이 증가하여 교차시에는 대량으로 유입되는 것으로 나타나, 이에 대한 대책이 요구되었다. 따라서 터널굴착 장비선정시 지하수 유입에 대한 관측이 가능하고 수압에 대한 대응력이 우수한 EPB 장비를 선정하는 것이 타당한 것으로 결론내릴 수 있었다.

### 4.1.3 지표수 유입 가능성 검토

집중호우 및 홍수시 환기구와 정기장 주변의 지표수위 변화를 검토하여 지표수 유입을 방지하기 위한 최적의 환기구 높이를 선정하고자 하였다. 지표수 유입은 한강명암, 배수관거 역류, 능수구배에 의한 환기구 주변 지표수위 변화 등에 의해 발생하는 것으로 종합 검토되었으며, 설계기준은 “한강수계 하천 정비기본계획”에 준하였고, 한강의 최대홍수량이 200년 빈도에서 37,000m³/sec가 발생하는 것으로, 최대 홍수위는 16.88m(EL. 116.88m)인 것으로 정하였다.

강남구간에 위치한 환기구 #5부근은 지반고 EL. 119.48m로 집중호우시 최대 수위 EL. 118.91m보다 높은 고지대이므로, 환기구를 통한 지표수 유입가능성은 낮은 것으로 예상된다. 배수관거도를 검토한 결과 그림 15에서 보듯이 주역류 발생은 환기구 구간과는 400m 이상 이격되어 있는 것으로 나타났다. 강북구간의 환기구 #4 부근은 비교적 고지대에 위치하고 있으며, 집중호우시 최대수위가 EL. 113.83m(지반고 118.29m)로 환기구 유입가능성은 낮은 편이다. 배수관거 역류가 발생하는 지점도 환기구에 약 135m 정도 이격되어 있다.

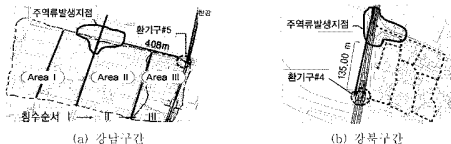


그림 15. 강북구간 지표수 유입가능성 검토

강남·북 구간에 대한 지표수 유입가능성을 검토한 결과 환기구를 통한 유입가능성은 낮은 것으로 나타났으며, 주변지형에 대한 침수가능성도 200년 빈도의 경우 적용시 침수가능성은 낮은 것으로 나타났다. 다만, 최근 이상기후로 인한 집중호우가 빈번하게 발생하는 점을 감안하여 향후 침수 방지를 위한 환기구 높이는 강북측에 위치한 환기구는 2.0m, 강남구간은 1.5m로 산정하였다. 또한 환기구 환기풍도에 투버를 설치하였고, 경기장 출입구 차수판을 계획하여 지표수와 빗물의 유입을 차단하였다.

#### 4.2 이벤트트리 기법을 이용한 위험도 분석

한강 하저에 시공되는 터널의 특성상 고난이도의 안전시공과 정밀시공이 요구된다. 따라서 설계 단계에서 위험요소에 대한 사전분석 및 대응책 마련을 위해 위험도 분석평가 기법(Risk Analysis and Evaluation)인 이벤트트리기법(Event Tree Method)을 도입하여 본 구간에 대한 종합적인 위험도를 평가하였다.

초기사건인 과업구간의 문제점은 경험적 분석, 하저터널 사례분석, 수리모형시험 분석, 수리·수분 결과분석, 과업구간의 문제점 도출 등의 과정을 통해 시공중에 발생가능한 사항으로 ① 지질이 상대에서의 누수로 인한 시공곤란, ② 고수압 작용대에서 막장면을 통한 지하수 유입, ③과 ⑤ 집중호우 발생시 개착구간(환기구, 정거장) 월류에 의한 침수와 유선, ④ 운영중에 발생 가능한 세그먼트와 접속부에서의 누수 등이 있다. 이러한 위험요소를 하나의 이벤트로 작성한 후 설계와 운영 과정에 따른 이벤트 트리로 구성하여 확률론적 평가를 수행함으로써, 전체 시스템의 안정성을 평가하도록 하였다. 이벤트 트리 방법에 의한 시스템 안정성을 평가한 결과 다음 표 16과 같이 암반등급별 위험도가 산정되었으며, 이에 대한 개선 권고수준과 개선목표치를 설정할 수 있었다.

표 16. 이벤트 트리 분석결과 암반등급별 위험도와 개선 목표

위험등급 분류	개선 권고수준 분류		개선 목표치 설정기준		
	권고수준	내용	위험등급	개선 권고수준	결과내용
5등급 무시	I	재해발생율 95% 차단	1, 2	I	매우 높은 위험
4등급 여유			3, 4	II	높은 위험수준
3등급 심각			5	III	낮은 위험
2등급 중대	II	여유수준 확대			
1등급 재앙	III	I, II의 수준에 따라			

전문가 집단에 의해 제안된 재해발생 확률에 대한 분석치와 목표치에 따라, 지질이상대, 수압작용대, 시공중 호우 가능 지역, 운영중 호우 가능지역 등으로 세분화하여, 분석치와 목표치의 발생확률을 계산하였다. 그림 16에서와 같이 위험도분석과 과업구간 지질 및 현황 등을 통해 터널안정성 확보를 위한 개선방안을 산정하여 각각의 경우에서 분석치가 목표치 이하가 되도록 설계에 반영하였다.

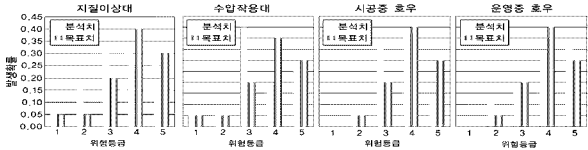


그림 16. 초기 위험 예상구간 분석

### 4.3 시공중 누수 및 침수대책

#### 4.3.1 시공중 누수위치 찾기

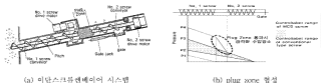
시공중 발생하는 누수는 일반적으로 지질조건이 불명하여 예상치 못한 수압이 작용하거나, 구조물 연결부 명수신계의 미배 등의 원인에 의해 발생한다. 본 구간에서 이러한 누수 예상위치는 다음 표 17과 같이 크게 나누어 4개의 구간으로 구분할 수 있다.

표 17. 차입구간 누수 발생 예측구간

① 원드 장비관련	• 시공경험을 통한 누수부위 확인 ⇨ 누수위치별 장비개선
② 침속부	<ul style="list-style-type: none"> <li>합간 및 도관구</li> <li>• 침입부 누수발생 가능 ⇨ 그라우팅, 방관대원거시기 조성</li> </ul>
③ 쇄단 연파성 침속부	• 침속부 누수가능성 분석(다시연조인트와 시공조건에 적합한 방수대책 수립)
④ 새그먼트 관련	• 이음부누수 발생, 시공물리론 ⇨ 누수가능부위에 따라 철저한 방수 대책 수립

#### 4.3.2 지질조건을 고려한 장비선형

원장부위를 위한 굴착공법은 안전성을 최우선으로 하여 밀폐식 원드TBM공법으로 선정하였으며, 파쇄대 및 강판굴착식 안전성과 시공성에서 유리하고, 이탄스크류컨베이어 채택으로 고수압 구간에 대한 대응능력을 확보할 이도입식(EPD) 원드 장비를 선정하였다.



(a) 이탄스크류컨베이어 시스템

(b) plug zone 형성

그림 17. 이탄스크류컨베이어 개념도

기존의 이탄스크류컨베이어를 사용하는 EPD원드는 정압적으로 수압이 30kgf/cm<sup>2</sup>이하로 작용하는 구간에서 적용되어 왔으며, 최근에는 고수압을 대기압 수준으로 저감시킬 수 있는 이탄스크류컨베이어가 개발되어 출수유압차단 및 안전성이 향상되었다. 이 방법은 최대수압 5kgf/cm<sup>2</sup>의 열분해원터널에서 적용되어 신뢰성을 입증하였다. 또한, 3kgf/cm<sup>2</sup> 이상 고수압구간에서 기존 시공법에 의한 물분류수시서도 안전하게 통과 가능하도록 기존 3명 레일사이에서 1명의 긴급저수압장치(Emergency water stop seal)를 적용하였다. 긴급저수압장치 작동 원리는 고압수 또는 유압을 긴급저수압차단부 Rubber plate에 적용시켜 저수압치를 생성시킴으로서 레일간의 물수압력을 향상시켜 레일보야드로 유입되는 고압수를 차단하는 것이다.

#### 4.3.3 침속부 누수대책

원드 TBM터널 방진부 및 도관부에서 방생가능한 누수를 방지하기 위하여, 차수 그라우팅 계획 및 방관대 원거시기기를 지반연장과 연계하여 권장하도록 하였으며, 방진부 및 도관부에서 누수가 문제될 것으로 예상되는 부분에 대한 대책을 수립하였다.(감용일 외, 2005)

폐단연파성 구간에 대해서는 시공중에는 차수그라우팅을 통해 누수 가능성을 최대한 억제하고, 본선 운전시에는 강제새그먼트를 미리 설치하여, 폐단연파성 저보공과 용접처리되도록 하였다. 그리고 폐단연파성 구조물과 침속되는 부분에는 수생항상 저수제를 설치하고 구조물 연결부에 저수관을 부여 디넨네로 풍어 유입되지 않도록 계획하였다.





#### 4.4.2 허용누수량 산정

월드TBM 터널구간과 환기구구간은 비배수형 터널로 설계하였으나 실질적으로 완전방수는 불가능하다고 판단되어 허용 누수량(0.5m<sup>3</sup>/min/km)을 최소화시킨 비배수형 터널 개념으로 설계를 수행하였다. 허용누수량을 산정하기 위하여 독일(DS853, DIN 4122), 서울지하철 건설본부(지선감 58700-2303, 1996) 및 대한토목학회(1997) 등의 문헌자료를 검토하여, NATM 복선구간의 허용누수량은 3.6m<sup>3</sup>/min/km (「한강하저 터널 구조물 설계와 시공(서울시 지하철 건설본부)」)으로 하였고, 비배수형터널인 월드TBM구간의 허용 누수량을 0.5m<sup>3</sup>/min/km 로(「철도 월드터널 누수 대책에 관한 보고서(일본)」)산정하였다.

표 19. 허용누수량 산정결과 [단위 : (m<sup>3</sup>/min/km)]

NATM 구간	구분	지하철운영 자료분석치	기존설계 적용치	일본터널 자료	수치해석 (Seep/w)	수치해석 (Pentagon-3D)	설계 적용치
		최대용수량	3.79	3.0	0.2	1.59	2.00

월드구간	구분	철도 A	철도 B	철도 D	설계적용치
		최대용수량	0.552	0.068	0.238

※ 일본내 월드 터널 누수량 선속치

#### 4.4.3 운영중 배수 계획

운영중 배수구의 통수능력은 표 20에 수록하였으며, 그림 19의 허용누수량과 누적유입량 도표로부터 터널통과구간의 배수설계를 수행하였다. 또한 침수정내 예비펌프를 배치하여 비상시 충분한 배수능력을 확보할 수 있도록 계획하였다.

표 20. 배수구의 통수능력

구분	규격(mm)	터널연장(m)	배수요구량(m <sup>3</sup> /min)	치리가공량(m <sup>3</sup> /min)	비고
월드터널	노면 Ditch (340x278)	846(한강하저)	0.423	6.160	O.K
NATM터널 (복선)	중앙 배수관 (ø400)	218(중점부)	0.663	38.794	O.K
	측벽 배수관 (ø150)	218(중점부)	0.442	2.833	O.K

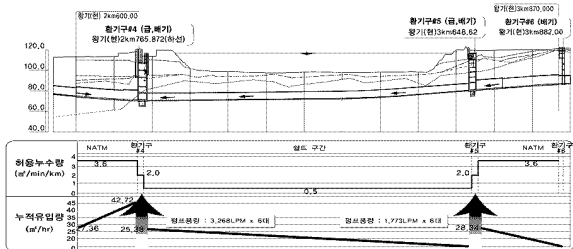


그림 19. 과업구간의 허용누수량과 누적유입량 곡선



## 5. 비상사태 재난방재 시스템

### 5.1 통합재난관리 시스템 개요

통합관리시스템은 비상사태시 조기감지 기능이 우수하여 신속한 대처가 가능하고 피해를 최소화할 수 있도록 구성되어야 한다. 이를 위해 시스템간의 최적연동 운전 및 이종 감시 체계를 구축하여 신뢰성 향상과 통합관리 절차 및 업무절에서의 터널 운영현황을 집중 관리하는 방안을 제시하였다. 한강하저 터널구간에서 발생할 수 있는 누수와 화재 등 비상사태에 대한 상시 자동감지시스템을 구축하였으며, 통합제어시스템으로 통합 운영되도록 계획하여 비상시 대처능력을 개선하였다.

표 21. 누수 및 화재 감지시스템 개요도



### 5.2 통합관리시스템 운영방안

한강하저구간에 누수나 화재가 발생한 경우에 대한 통합시스템을 구축하여 체계적이고 합리적인 대처방안을 수립하였으며, 단계별 상세한 대응방안을 계획하였다. 이로써 비상사태가 발생하더라도 체계적으로 대처할 수 있도록 설계단계에서 고려하여 안전하고 쾌적한 터널이 되도록 하였다.

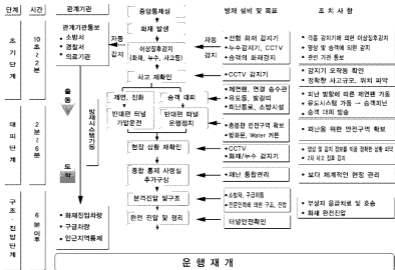


그림 22. 비상시 단계별 대응방안

## 6. 결론

대지구하철화재, 홍지문터널화재 등으로 지하공간에서의 안전에 대한 시민의식이 향상되었으며, 밀폐된 지하공간인 터널의 특성상 화재나 침수 등이 발생될 경우 대규모 인명피해가 발생할 수 있다. 따라서 설계단계에서부터 이에 대한 상세한 검토를 수행하여 승객의 안전을 확보할 수 있도록 하였다. 국내·외 설계기준 및 화재사례, 이론조사 등을 통하여 터널내 대피통로(walk-way), 환기구내 피난계단, 피난연락경 2개소를 설치하였으며, 이밖에도 유도등, 발광띠, 피난계단, 안전손잡이 등의 유도설비를 설치하여 피난시간을 단축시켰다. 화재의 조기발견과 초기진압을 위하여 터널 전구간에 선형화재감지기를 설치하였고, 연결송수관과 소화기 등을 배치하였다. 이러한 시설을 설치로 하차시간은 30%, 총대피시간은 22% 감소하여 승객의 피난안전성이 향상되도록 계획하였다. 또한 피난시나리오를 구성하여 대피동선과 제연방향을 제시하여 비상시 체계적으로 대처할 수 있도록 하였으며, 최악의 구간에 대한 화재시뮬레이션의 수행으로 역기를 발생이전인 4분이내에 제연을 하도록 하여 비상시 승객의 안전성 확보가 가능하도록 방제시나리오를 작성하였다.

한강하저구간이라는 특수성을 고려하여 시공 및 운영중에 침수·누수에 대한 수방대책을 수립하였다. 이를 위해 지반조사와 수치해석을 통하여 연약대, 파쇄대 등의 위험구간을 선정하였다. 또한, 시추공 모형실험으로 폐공되지 않은 기존시추공과 터널 조우시 영향을 평가하였으며, 개착구간을 통한 지표수의 유입을 차단하기 위하여 집중우수시 침수높이를 검토하였다. 이러한 사전조사 결과를 근거로 이벤트트리기법을 적용하여 설계목표치를 설정하였다. 장비선경시 고수압 및 시추공과 조우시에 대처가 용이한 EPB 워드 TBM 장비론 선정하였고, 2단스크류콘베이어, 긴급저수장치 등을 채택하였다. 또한, 이음부에 대한 누수방지 대책을 수립하였고, 고강도재결방식, 가스켓복합형 실재, 세그먼트 손상방지장치 등을 적용하여 세그먼트 방수가 철저히 이루어지도록 계획하였다. 그러나 한강하저구간의 완전한 방수가 불가능하다고 판단하여 설드구간 허용누수량을 0.5m<sup>3</sup>/min/km로 하였고, 누수감지 시스템을 구성하여 비상방수문 및 배수시스템과 연계하여 침수 방지를 계획하였다.

이상과 같은 방제계획시에 Fail-safe 개념을 기본으로 하여 화재, 누수 등의 터널내 이상정황을 다양한 기법을 통하여 감지할 수 있도록 계획하였으며, 화재감지시스템과 누수감지시스템을 통합하여 통합시스템을 구성하였다. 또한, 비상시 단계별 대응방안의 제시로 체계적이고 신속하게 대처할 수 있도록 계획하여 안전한 한강하저 터널을 계획하였다.

## 참고문헌

1. 김원환 외, "고속도로터널의 피난연락경 규격 및 설치간격", 터널기술 vol.4, no.1, 2002, pp. 40~49
2. 피난연락경 설치기준검토, 한국도로공사, 2003
3. NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and passenger Rail System, 미국 National Fire Protection Association, 2000 Edition
4. 설계요령 제3집, 일본도로공단, 1997
5. Bundang Subway Alternative bidding Design Lot. 3 Technical Report, Lahmeyer International GmbH, Germany, 2003, pp. 1~38
6. 이인보 외, "침투력이 터널벽장의 안정성에 미치는 영향연구 - 모형실험을 중심으로", 한국지반공학회, 2001 봄 학술발표회 논문집, 2001, 3, pp41~48
7. 고려대학교 부설 방제과학기술연구센터, 분당선 3공구건설공사 대안설계(한강통과구간) 수방대책 검토 보고서, 2003.
8. 정경환 외, "Shield TBM", 터널기술 Vol.4, No.4, 2002, pp. 20~48.
9. 相久昭正 외, "泥土系シールドにおける高水壓下でのスクリーコンベアの山留め・止水効果", 1993.
10. 전기찬 외, "한강하저 통과구간에서의 대구경 설드TBM 장비선정", 터널기술, Vol. 5, No. 3, 2003, pp. 53~63.
11. 和佐勇次郎, "防水性向上に對する研究(その1)-東京灣橫斷道路",シールドトンネル土木工學社, 1992
12. 김용일 외, "세그먼트 방수제의 방수성능 평가", 제 4차 터널기개회 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회, 2003.
13. 김용일 외, "분당선 하저터널건설시 수방대책", 제 3회 터널 시공기술 향상 대토론회 논문집, 대한토목학회, 2003, pp. 13~161