한강하저터널의 환기 방재 시스템 구축방안

대 우 건 설

김 용 일*1, 조 상 국*2

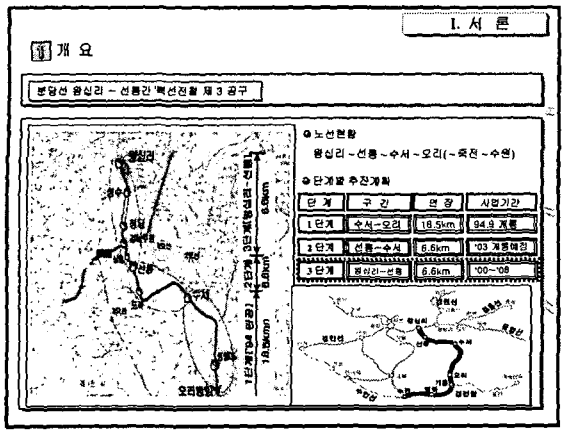
*1 : ㈜ 대우건설 토목사업본부 차장, 공학박사
*2 : ㈜ 대우건설 토목사업본부 전무

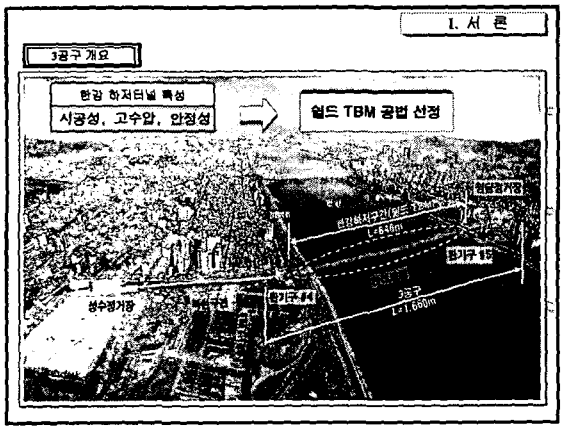
발 표 순 서

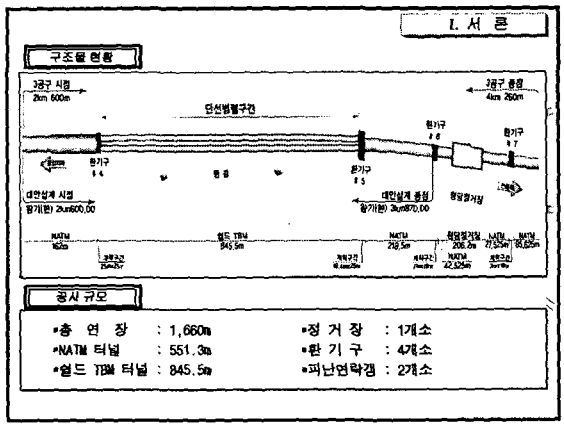
I. 서 론
II. 방재설계 기준 및 사례분석
III. 한강하저터널의 특성분석
IV. 환기 및 제연계획
V. 피난연락갱 및 방재설비
VI. 화재 및 피난시뮬레이션
VII. 수방계획
VIII. 통합재난관리 시스템
IX. 결 론

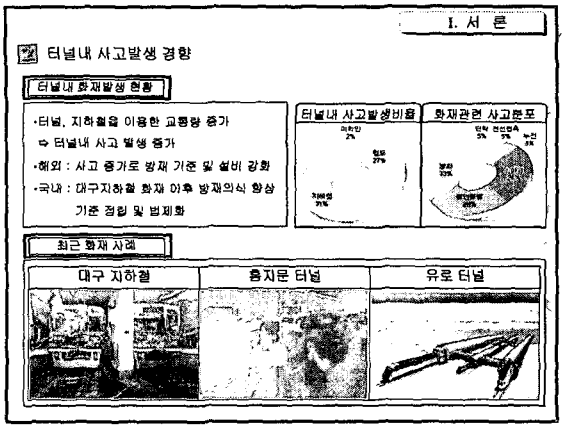
I. 서 론

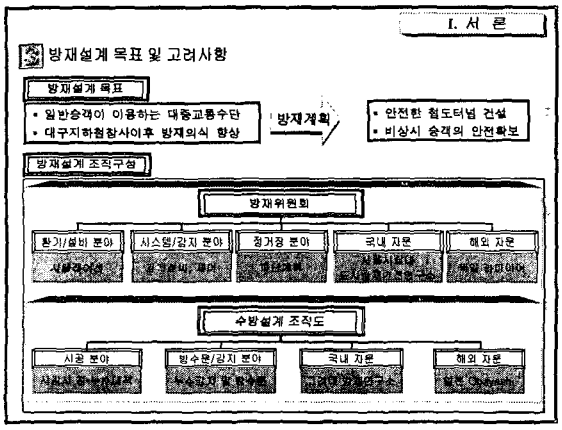
개 요
터널내 사고발생 경향
방재설계 목표 및 고려사항

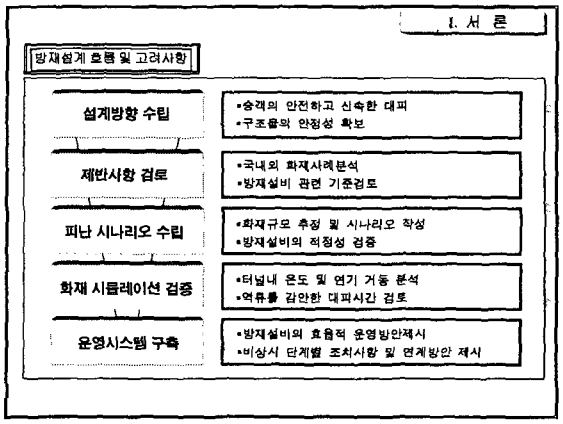

I. 서 론
개 요
분당선 왕십리 – 선릉간 복선전철 제 3 공구
노선현황
왕십리 – 선릉 – 수서 – 오리(– 죽전 – 수원)
단계별 추진계획
단 계
구 간
연 장
사업기간
1 단계
수서 – 오리
18.5km
94.9 개통
2 단계
선릉 – 수서
6.6km
'03 개통예정
3 단계
왕십리 – 선릉
6.6km
'00 – '08
오리정거장


I. 서 론
3공구 개요
한강 하저터널 특성
시공성, 고수압, 안정성
쉴드 TBM 공법 선정
성수정거장
환기두 #4
3공구
L=1,660m


I. 서 론
구조물 현황
3공구 시점
3공구 종점
단선병렬구간
환기구
대안설계 시점
대안설계 종점
쉴드 TBM
공사 규모
•총 연 장 : 1,660m
•NATM 터널 : 551.3m
•쉴드 TBM 터널 : 845.5m
•정 거 장 : 1개소
•환 기 구 : 4개소
•피난연락갱 : 2개소


I. 서 론
터널내 사고발생 경향
터널내 화재발생 현황
·터널, 지하철을 이용한 교통량 증가
⇨ 터널내 사고 발생 증가
·해외 : 사고 증가로 방재 기준 및 설비 강화
·국내 : 대구지하철 화재 이후 방재의식 향상
기준 정립 및 법제화
터널내 사고발생비율
화재관련 사고분포
최근 화재 사례
대구 지하철
홍지문 터널
유로 터널


I. 서 론
방재설계 목표 및 고려사항
방재설계 목표
• 일반승객이 이용하는 대중교통수단
• 대구지하철참사이후 방재의식 향상
방재계획
• 안전한 철도터널 건설
• 비상시 승객의 안전확보
방재설계 조직구성
방재위원회
환기/설비 분야
시스템/감지 분야
정거장 분야
국내 자문
해외 자문
수방설계 조직도
시공 분야
방수문/감지 분야
국내 자문
해외 자문


I. 서 론
방재설계 흐름 및 고려사항
설계방향 수립
•승객의 안전하고 신속한 대피
•구조물의 안정성 확보
제반사항 검토
•국내외 화재사례분석
•방재설비 관련 기준검토
피난 시나리오 수립
•화재규모 추정 및 시나리오 작성
•방재설비의 적정성 검증
화재 시뮬레이션 검증
•터널내 온도 및 연기 거동 분석
•연유를 감안한 대피시간 검토
운영시스템 구축
•방재설비의 효율적 운영방안제시
•비상시 단계별 조치사항 및 연계방안 제시

II. 방재설계 기준 및 사례분석

1. 국내설계기준
2. 해외 설계기준
3. 화재 사례 분석
4. 여론조사를 통한 방재계획 수립

1 국내 설계 기준

- 지하철 역사에 관련된 기준이 주류임
- 대구지하철 화재사건이후 방재설계기준이 재정립되고 있음

도시철도 관련기준

구 분	세부 항목	세 부 내 용	기존 기준
토 목	저심도 정거장	• 저심도 정거장으로 설계 • 승강장의 피난출구 2개소 이상 계획	- -
	철근의 최소엄개	• 내화시간 3시간(NFPA 220), 최소피복두께	-
유도설비	유 도 등	• 조도 2lux 이상 확보 • 바닥유도등, 발광띠 설치	- -
	비상 조명등	• 조도 2.5lux로 상향조정, 전원 이중화	-
화재감지	전기소방시설	• 자동화재 감지기, 속보기	150m³ 마다 연기식
기계설비	소화설비	• 역사내 스프링클러 설치 • 소화기, 소화전 확충 및 위치표기 확대 • 연결송수관 100m 간격설치	- - -
	환기 및 제연	• 공조 및 제연덕트 분리	제연, 공조덕트 통합

2 해외 설계 기준

- NFPA 130(미국) : 엄격한 방재관련 기준제시, 전세계적으로 공인된 기준
- 국가별 상이한 기준 제시

국가별 기준

구 분	세부 항목	세 부 내 용
NFPA 130 (미 국)	제연설비	• 대피시 분선화기류 기류제어, 250℃에서 1시간이상 작동
	피난연락갱	• 244m 이하간격, 1.5시간 이상의 내화성 방화문
	비상탈출구	• 381m 이하 간격
	연결송수관	• 직경 Ø100mm 이상의 건식, 모든 지하철에 설치
	비상조명	• 비상시 2.69lux 이상
일 본	터널조명	• 1,000m 이상 터널에서 44m 간격으로 설치
	유도표시	• 최대 100m 간격
	통신설비	• 경보·통신설비 250m 이내 설치, 불연성 전선 사용
영국	피난통로	• 터널내 피난통로 설치
	수직구	• 3,000m 간격으로 설치, 경제성 고려

화재 사례분석

국내 사례분석

구분	현 황 도	화재 개요
대 구 지하철		• 방화로 인한 화재 • 초동조치 미흡 및 종합방재시스템 부재 ⇨ 대규모 화재로 확산 • 피난 유도설비 및 조명시설 부족
흥지문 터 널		• 차량충돌후 화재발생 • 과부화로 인한 전력차단으로 환기시설 미작동 • 피난연락갱 750m 간격으로 설치 (이용자 없었음)

개 선 안

- 불연성재료의 사용 필요
- 화재초기 감지 및 조기통보시설 확충
- 전력공급의 신뢰성 확보 및 충분한 제연용량 필요
- 피난연락갱 설치 및 신속한 승객 피난유도

해외 사례분석

구 분	화재 개요	피해상황	원인분석
프랑스국유철도 (1971. 11)	• 터널내 탱크열차와 화물열차가 충돌 • 폭발상황에서 24시간 연소	사망 2명	•소방시설 없음
일본JR북륙터널 (1972. 11)	• 침대차 식당칸에서 발화 • 열전과 연기, 열기로 인해 사상자 다수 발생	사망 30명 부상 714명	•초기진화 실패 •2차사고 대책미비
센프란시스코만 해저터널(1979)	• 차량 최첨차단기의 고장에 의해 발화 • 반대편 열차로 승객 구출	사망 1명 부상 10명	•2차사고 대책미비 •비상시설 미비
용불광 터널 (1999)	• 화물 냄동차 화재 / 차량간 근접거리 주행 • 터널관리의 이원화로 체계적인 관리 미흡	사망 41명 차량 33대 파손	•체계적인 관리 미흡
유로터널	• 화재 발생후 감지시스템(연기, 적외선) 작동 • 피난연락갱(375m 간격)으로 신속한 피난	인명피해 없음	•방재시설 및 시스템 구축

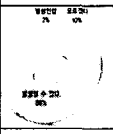
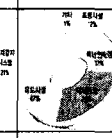
개 선 안

- 피난연락갱 설치로 피난시간 단축
- 초기화재 감지설비 설치
- 체계적인 방재시스템 구축

여론조사를 통한 방재계획 수립

- 일반승객의 방재의식 조사를 통한 승객중심의 방재계획
- 승객의 행동양식, 방재시설을 인지도 등을 고려한 시설을 계획

여론조사 결과

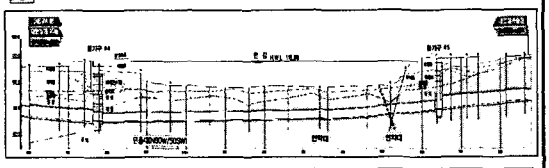
구분	대형참사 가능성	화재 예방	승객 대피	연기 확산
결 과				
설계 반영	•승객안전 최우선 방재 계획 수립	•불연성, 자독성 재료 •선형화재 감지기 설치	•다양한 피난 유도설비 -유도등, 발광띠 - 대피통로	•충분한 제연용량 확보 •워터커튼, 방화문 설치 •시나리오별 제연계획

III. 한강 하저터널의 특성분석

1 한강하저터널의 특성분석

III. 한강하저터널의 특성분석

1 한강하저터널의 특성분석



	문제점 도출		대응방안
지형 · 지질	•고수압작용(최대 5kgf/cm²) •누수 발생시 터널 침수로 발전가능 •시추공을 폐공처리만함(30~40공 추정)	→	•시공시 고수압 대응장비 선정 •방수대책수립 •시추공 영향평가 수립(수리모형시험)
공간 · 사용적 특성	•밀폐된 지하공간으로 비상시 공포감 가중 •피난방향과 연기방향이 동일 •탈출구인 정거장까지 원거리 •지상에서 상황파악이 어려움		•피난 유도설비 계획 •시나리오별 제연계획 수립 •비상탈출구 및 피난연락갱 계획 •자동 감지기 및 CCTV 설치

IV. 환 기 및 제 연 계 획

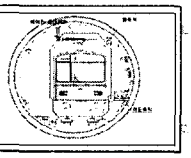
1 환 기 계 획

2 환기시뮬레이션을 통한 최적의 환기방식 선정

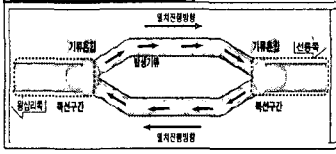
1 환 기 계 획

환기의 주요 원인

- 열차의 발열 : 터널내 온도 증가
- 라돈 등의 오염 물질 축적 : 터널 오염방지
- 에어컨 효율저하 : 승객 불쾌감 유발



한강하저 구간의 환기의 특징



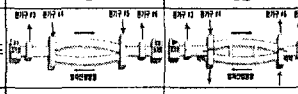
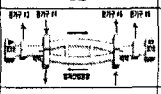
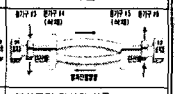
- 단선구간 : 열차 진행방향에 따라 터널내 기류 발생
- 복선구간 : 교행으로 기류혼합 및 와류발생

2 환기 시뮬레이션을 통한 최적의 환기 방식 선정

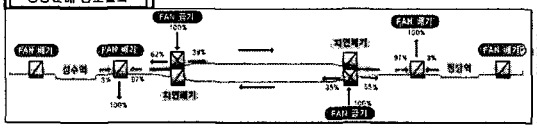
검토 조건

해석 프로그램 : SES (Subway Environment Simulation) Ver. 4.0
기류속도 : 10 cm/sec
터널내 온도 : 31.9 ℃(오전), 35.2 ℃(오후), 34.5 ℃(저녁)

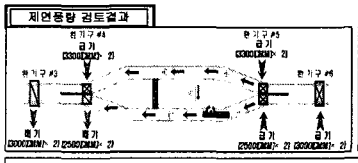
한강하저 구간의 환기방식 비교

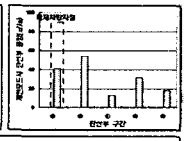
구 분	1안	2안	3안
개요도			
특징	#3, #6 배기 #4, #5 급기	#4, #5 급·배기로 분리 일부구간 격벽설치	복선구간 단선화 시공 #3, #6 급·배기로 분리 #4, #5 환기구 삭제
장단점	기류 재순환, 재유입으로 단선 구간 온도증가 환기 효율 저하	미스트효과 최대로 활용 격벽설치로 기류 재순환 방지 유지관리비 절감	단선구간 확대로 환기효율 최대 공사비 증가 시공중 작업구(#4, #5)확보 곤란
선정안		○	

풍량분배 검토결과



제연풍량 검토결과



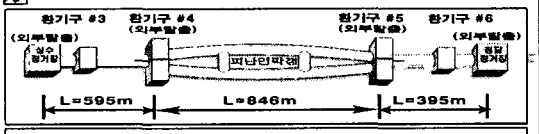


충분한 기류이용성 확보
화재 지점에서 41.0 CMS의 풍량으로 충분한 제연성능 확보

V. 피난연락갱 및 방재설비

1. 현황 및 피난 기준
2. 피난연락갱 계획
3. 비상탈출구 계획
4. 피난통로 계획
5. 방재설비 계획

1 현황 및 피난 기준



정거장 사이 거리(피난거리) = 1,855 m : 피난시간이 길어 비상시 위험

⇒ 비상탈출구 및 피난연락갱 계획 : 탈출구 이원화 및 안전구역 확보

NFPA 130 기준

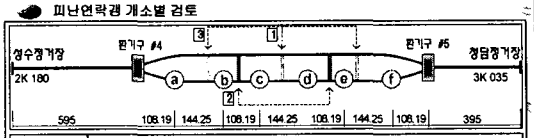
비상탈출구	피난연락갱
• 터널에서 안전지점까지 설치되어야 함 • 계단은 일피되어야 하며, 안전지역으로 연결 • 설치간격 : 381 m 이내	• 오염되지 않은 환경으로 연결되어야 함 • 1.5시간 내화성능을 갖는 방화문 설치 • 연기를 제어할 수 있는 환기시스템 필요 • 설치간격 : 244 m 이내

2 피난연락갱 계획

설치 기준

구 분		설치기준		비 고
피난 연락갱	NFPA 130	244 m	가장 엄격한 기준	최소 간격 제시
	EBA(독일)	1,000 m	-	
	BOStrab(독일)	600 m	-	
	영국	750 m	-	

피난연락갱 개소별 검토

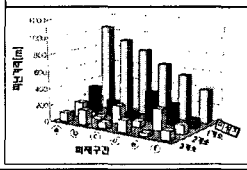


검토조건	피난연락갱			
	0개소	1개소	2개소	3개소
화재위치	a, b, c, d, e, f(6곳의 화재 발생 가정)			

V. 피난연락갱 및 방재설비

검토 결과

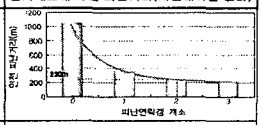
최악의 위치	•① 위치가 최악임 : 연기역류, 피난거리 고려
피난 거리	•개소에 따른 최악의 위치에서의 피난시간 검토 •2개소와 3개소일 경우의 차이 미미함

검 토 결 과	분 석 결 과
	•미설치시 피난거리가 길어 매우 위험함 ⇒ 피난연락갱 설치 필요 • 2개소 이상에서 피난거리 감소 • 2개소와 3개소의 차이가 미미하게 나타남

V. 피난연락갱 및 방재설비

피난연락갱 개소별 결정

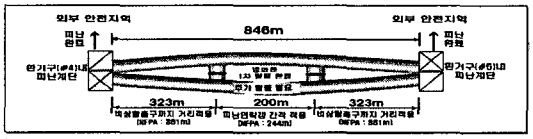
고 려 사 항	•시공성, 구조적 안정성, 피난의 안전성 •한강하저구간의 특성 : 침수, 누수, 단층대, 시추공과의 조우 가능성

설치개소에 따른 수재 안전성	설치개소에 따른 피난거리(시뮬레이션 결과)
•한강하저구간 시추시 파공처리 안함 -30~40 공 추정(기존, 실시, 대안설계시) •단층대, 파쇄대 존재 가능	
•개소 증가시 - 화재 안전성 증가 급격히 둔화 - 수재 안전성 급격히 감소	•개소 증가에 따른 피난거리 감소 •1개소 이후 수렴하는 추세를 나타냄 •2개소 이후 피난거리 변화 미비 ⇒ 2개소 적용

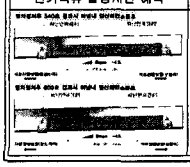
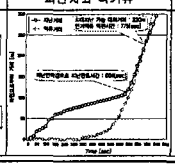
피난연락갱 2개소 적용

V. 피난연락갱 및 방재설비

피난연락갱 간격



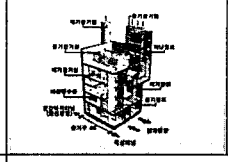
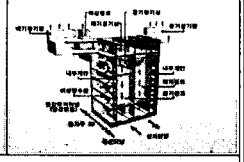
피난연락갱 배치 및 간격의 적정성 검증(시뮬레이션)

연기역류 발생시간 예측	피난자와 역기류	검 토 결 과
		•NFPA 설치기준(244m) 만족 •역기류 추월거리 : 230 m •역기류 발생시점 : 화재발생 6분 ⇒ 4~5분 이내에 제연운전 시작

비상 탈출구 계획

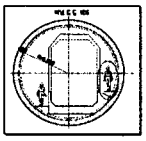
- 환기구 #4, #5에 피난 계단을 설치하여 비상 탈출구로 활용
  ⇨ 탈출구 이원화로 피난 안전성 향상
- 환기통로와 완전히 분리하여 승객 안전 확보
- 피난계단을 별도의 제연팬을 설치하여 연기유입 차단

→ 승객 안전 확보

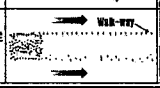
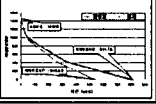
	환기구 #4	환기구 #5
개요도		
특징	•별도의 환기 통도 설치 •계단폭 확대로 피난효율 향상	

피난통로(Walk-way) 계획 : 승강장 높이

열차탈출 용이	외부탈출구와의 접속수월
•열차탈출시 혼란 방지 •어린이, 노약자, 장애인 탈출용이 •탈출시간 단축	•피난연락갱과 자연스런 접속 •피난계단과의 원활한 연계 ⇨ 승객불안 감소, 피난 시간 단축



피난통로 설치 적정성 검토

구 분	시뮬레이션 결과	현 황 도	검 토 결 과
피난통로 미설치시			•승객이 출입문쪽으로 몰림 •하차통로시간 4.5분 단축
피난통로 설치시			

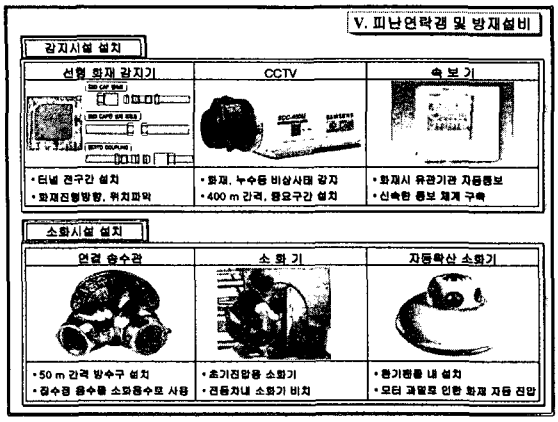
방재 설비 계획

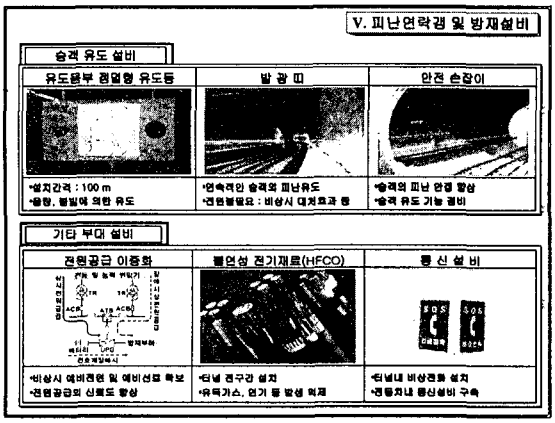
- Fail-safe 개념 도입 : 감지체계, 피난체계의 이원화
- 신속한 초기대응을 위하여 자동감지시설 및 소화시설 설치
- 비상시 승객혼란을 최소화

비상방화문 검토

- 방화문 설치 기준 : 2.4m(W) × 2.1m(H) 이상, 1.5시간 이상의 내화성 (NFPA 130 기준)

구 분	슬라이딩(미닫이문) 형식	플핑업(방화샷다) 형식
개요도		
선정	○	
선정사유	•작은 힘으로 개폐가 용이 •기밀성, 내열성, 내압성이 우수	





VI. 화재 및 피난 시뮬레이션

- 시나리오 검토 목적 및 조건
- 화재 구역별 대피 시나리오
- 화재 시뮬레이션에 의한 시나리오 적절성 검토
- 정거장 피난계획
- 비상시 구조물 안정성 검토

1 시나리오 검토 목적 및 조건

검토목적

피난용이성	• 방재설비의 체계적인 작동모드 계획 ⇨ 이용자 및 시설물의 피해 최소화 • 사고발생 위치별 승객의 피난 안전성 검토
설계적정성	• 방재 시설물의 적정성, 효과 등을 검증 • 피난안전성 검증

검토조건

요구조건	•피난연락갱 간격 •비상상황 발생 지점 •화재시 터널 이용자의 대피시간 •인근 소방서, 병원의 위치 및 터널과의 거리	⇨	•터널내 피난연락갱 200m 간격으로 설치 •3개구역으로 구분하여 시나리오 설정 •화재발생시 대피가능 시간 : 10분 •도착시간 구급차 15분, 소방차 경우 20분

2 화재 구역별 대피 시나리오

• 3개 구역으로 구분하여 시나리오 설정
• 역화전용 환기팬은 기류흐름 소멸뒤 팬 재가동(정지후 4~5분 : 역기류 발생이전)

CASE 1

승객의 대피 경로	제연팬 작동 모드

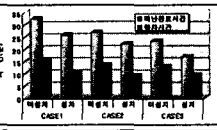
CASE 2

승객의 대피 경로	제연팬 작동 모드

CASE 3

승객의 대피 경로	제연팬 작동 모드

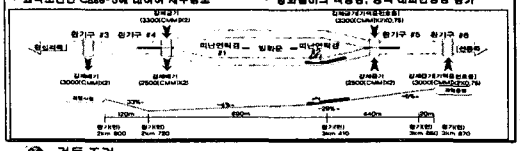
검토결과

개선사항	대피시간 개선
•●대피시간이 평균 22% 감소(피난연락갱 미설치 대비) •하차 시간은 피난연락갱이 없는 경우보다 평균 30.34% 감소 •대피시간 감소로 승객 안전	

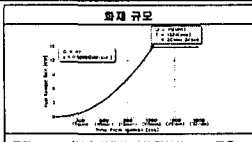
화재 시뮬레이션에 의한 시나리오 적절성 검토

검토개요

- 최악조건인 Case-3에 대하여 세부검토
- 방화설비의 적절성, 승객 대피안정성 평가



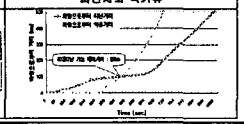
검토조건

화재 규모	열차정지시 공기의 관성력
	
•독일 IC Train(열차차량)의 실험 결과인 15MW적용	•열차정차후 공기의 관성력에 의한 기류존재

대피 인원 산정(NFPA 130 기준)

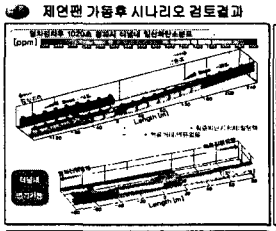
- 승하차 인원에 기반한 탑승인원 산정 (첨두시 제차인원 : 17,519명/hr)
- 오전혼잡시 교통량/hr x 운행열차수/hr × 혼잡율 =1,460 명

제연팬 미가동시 열·연기 거동분석

화재발생 6분후	피난자와 역기류
	

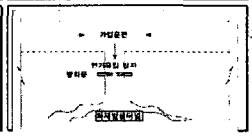
- 화재발생 6분후 역기류 발생 ⇨ 5분 이내에 배연운전 시작
  ⇨ 기류형성을 감안하여 4분후 가동시작
- 환기기 미가동시 최대 피난거리 : 98m
- 화재발생시 배연용 환기기 가동 필요

제연팬 가동후 시나리오 검토결과



시간	평상시록	선종록
3 분	201.6m	8.5m
	하차중	하차중
	다소 위험	다소 위험
10 분	환기구 #4 배기	역류없음
	피난완료(선종록터널)	165.3m
	안전	안전
17 분	환기구 #4 배기	역류없음
	피난완료(선종록터널)	피난완료(동탄역사)
	안 전	안 전

- 화재초기 열기류의 확산이 급격하게 발생됨
- 가압운전 : 신선공기 공급, 연기유입 차단
- 열차 선두에서 피난연락갱으로 신속한 대피 가능
- 정차 6분후 제연팬 가동으로 모든 승객 안전

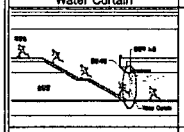
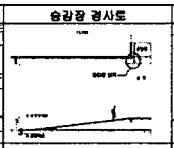
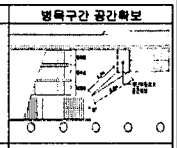


4 정거장 피난계획

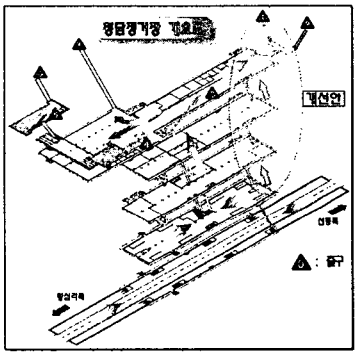
개 요

- 정거장, 터널내 화재시 정거장을 이용한 탈출
- 피난 시뮬레이션 수행후 개선사항 제시
- 승객 안전향상을 위한 시설물 계획

시설물 계획

Water Curtain	승강장 경사로	방독구간 공간확보
		
• 승강장 출입계단상 입구에 설치 • 평·연기 차단, 안전구역 확보	• 승강장-터널 연결부 경사로 설치 • 본선←→정거장의 원활한 피난	• 방독현상 감쇄(W=5.2m) • 하부계단 위치이동(W=6.0m)

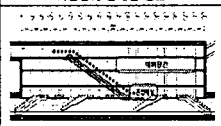
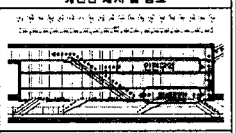
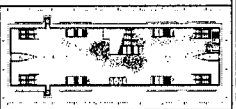
피난 시뮬레이션



검토조건

피난인원	1,951명
해석구간	승강장 → 출입구 통로
해석 시나리오	• 엘차출입문 개방후 피난개시 • 에스컬레이터, 엘리베이터 사용불가

검토결과

구분	기존설계 문제점 검토	개선안 제시 및 검토
개요도		
해석결과		
	• 총대피시간 : 10분 34초 • 승강장 계단부 방독현상 심각	• 추가 비상계단 설치 : 피난시간 9분 20초 • 방독현상 완화

VI. 화재 및 피난 시뮬레이션

비상시 구조물 안정성 검토

구조물 내화설계

검토 목적
- 피난 및 소방활동의 안전확보
- 구조물 손상에 의한 2차 피해방지

기준 및 검토조건
- 내화시간을 3시간으로 선정(NFPA 220 Code)
- ACI Code(216R-89)에 따른 내화 설계
- 최소 피복두께 결정

검토 결과

NATM 터널

쉴드 터널

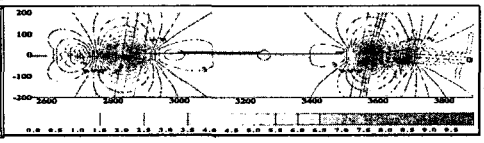
구분	위치	(+)Mnθ	(+)Mn_{max}	평가
NATM 터널	천단	146.84	90.37	OK
	측벽	131.56	72.34	OK
쉴드 터널	천단	162.74	101.56	OK
	측벽	142.72	95.78	OK

VI. 화재 및 피난 시뮬레이션

구조물 내진설계

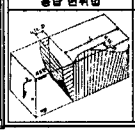
개요
- 한반도 지진 발생회수 증가
- 지진시 취약부 파손 ⇨ 터널 침수, 붕괴 등 2차사고발생 가능

지진 재해도



검토 결과

응답 변위법



해석 결과도

구분	위치	압축응력	허용응력	평가
NATM 터널	2+620	58.75	96	OK
	3+655	64.59	96	OK
쉴드 터널	3+120	64.16	180	OK
	3+520	124.57	180	OK

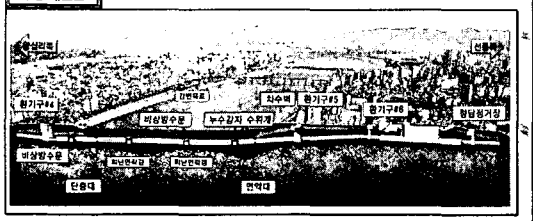
VII. 수방계획

1. 개 요
2. 시공중 침수 · 누수 대책
3. 운영중 침수 · 누수 대책

1 개 요

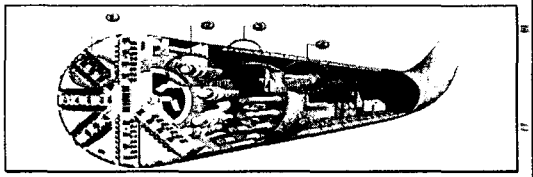
- 한강하저 구간으로 고수압 작용(최대 5 kgf/㎠)
- 시공 · 운영 중 누수 · 침수 가능성 항상 존재 ⇨ 누수 · 침수 대책 및 배수대책 수립

수방 개요도



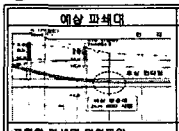
2 시공중 침수 · 누수대책

장비 자체 누수

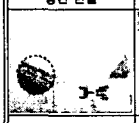


① Bit 교환회수 저감	② 구동부 토입자 방지	③ Tail seal 개선	④ 스크류컨베어 개선
내마모, 롤러 씰터 설치	토사실 이중구조	긴급 지수장치	2중 스크류 적용

지하수·지표수 유입대책

예상 파쇄대	기존 시추공	지표수 유입
		
•정확한 파쇄대 위치파악 •방향제어시추, 3D 전기비저항탐사	•수리모형시험 수행 •고수압 대응장비 선정	•수리수문해석으로 지표수위 검토 •유도배수(가제방, 가배수로)

세그먼트 누수대책

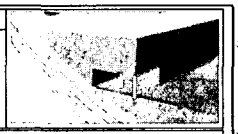
링간 연결	세그먼트간 연결	실링 (가스켓 복합형)	시공중 세그먼트 손상
			
•고강도 체결방식	•세그먼트 형상 개선	•시공오차 대응성 향상	•변층량, 보강 등 설치

운영중 누수 · 침수 대책

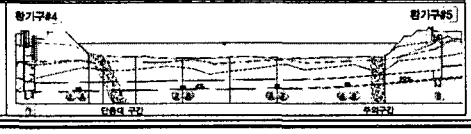
누수감지 시스템

개요	• 한강하저 고수압으로 누수가능성 항상 존재 • 누수시 신속한 대처로 피해확산 방지 ⇨ 누수감지 시스템 구축

누수감지 시스템의 구성

설치 및 운영방안	
• 수위변화를 통한 누수감지 체계 구축 • 2단계 누수감지 : 누수감지기 ⇨ CCTV • 수위 20cm 이상 : 경보발령 • 배수시스템, 방수문과 연계	

수위계 배치도

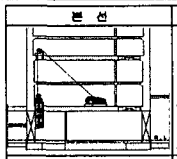
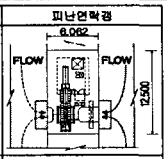


비상 방수문

비상방수문의 필요성

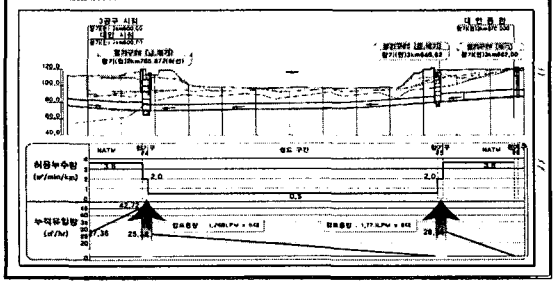
• 하저구간 침수시 한강수위 이하의 전구간 침수(분당선, 2, 7, 9호선)
• 반대편 터널의 안전 확보
⇨ 본선 및 피난연락갱내 비상방수문 필요

비상방수문 형식 및 운영방안

본 선	피난연락갱	운 영 방 안
		•누수감지 시스템과 연계 •수위변화 20cm 이상 ⇨ 방수문작동 •수시로 시험운전 실시 ⇨ 비상시 오작동 방지
•수직강하식 롤러게이트형	•미닫이식 고압밸브형	

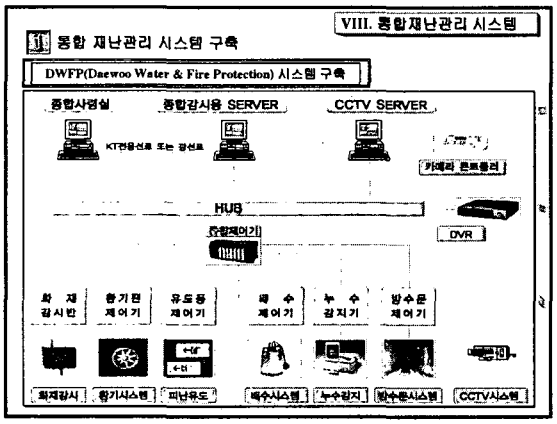
배수 계획

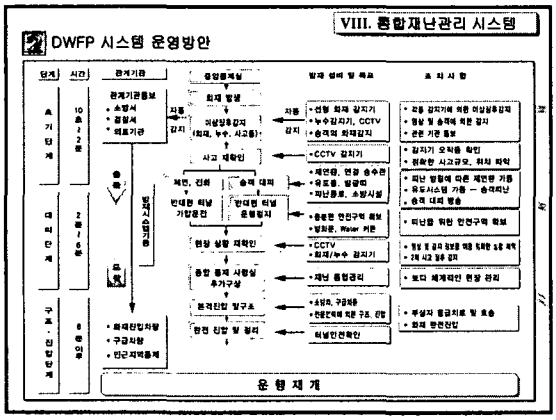
•구간별 허용 누수량 산정
•충분한 펌핑용량 확보, 비상 방수문, 누수감지 시스템과 연계



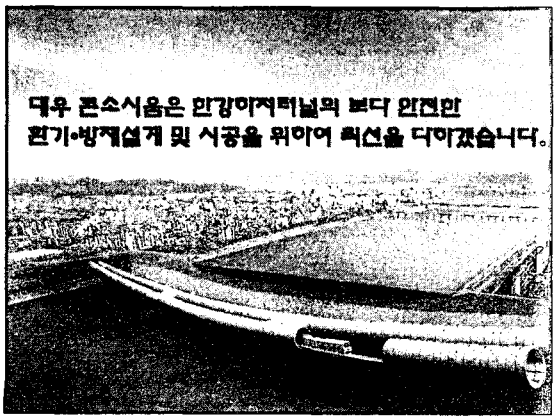
VIII. 통합 재난관리 시스템

1. 통합 재난관리 시스템 구축
2. DWFP 시스템 운영방안





IX. 결 론

IX. 결 론

- 터널내 화재 등의 비상사태 발생이 증가하는 추세로 방재계획 필요
- 비상시 밀폐된 지하공간의 특성상 대규모 인명피해 발생 가능
- 피난안전성, 시공성, 경제성 등을 고려한 결과 피난연락갱 2개소가 적절
- 피난연락갱 간격(200m) : NFPA 130규정에 적합
  - ⇨ 피난의 안전성 확보 ⇨ 승객안전 최우선
- 환기구 #4, #5 피난계단 설치로 비상탈출구로 활용
  - ⇨ 탈출통로 다양화 및 피난거리 단축 ⇨ 피난 안전성 향상
- 승강장 높이의 피난통로 설치
- 다양한 설비 구축 / 최소 2단계 안전장치 구축(Fail-Safe 개념)
- 다양한 시나리오 구성으로 설계적정성 및 피난안전성 검증
- 시공중/운영중 전체적인 안정성 확보
- 승객안전에 만전을 기하는 최적의 설계