

## 스크린도어가 설치된 지하철 승강장의 대피안전성 평가를 통한 제연환기구의 방재성능 개선방안 연구

### A Study on Smoke Extract Vents in a Subway with Screen door by Evacuation Performance Evaluation through RSET vs. ASET based on Computer Simulations

박형주<sup>†</sup> · 이영재<sup>\*</sup> · 신동철<sup>\*\*</sup> · 백동호<sup>\*\*\*</sup>

Hyung-Joo Park · Young-Jae Lee · Dong-Cheol Shin · Dong-Ho Baek

**Abstract** This study provides comprehensive design improvements covering technical issues concerning life safety matter in case of fire train stoppage in the middle of a tunnel. Recently Government announced that most of subway platforms will have screen doors in 3 years. Therefore, many fire safety engineers considered that they may contribute on life safety on train stoppage in tunnel. Especially The screen door can protect platform from smoke along tunnel ceiling when fire train stopped in tunnel. The study showed that platform ventilation ducts and the a tunnel ventilation chimney in the middle of tunnel in exiting subway tunnel could not guarantee life safety ability in terms of RSET vs. ASET comparison. Furthermore during evacuation process many peoples may be threatened from the smoke spread from the origin of fire. Although only additional vertical route can be installed in tunnels In order to decrease RSET, it will costs high or no spaces remains in outside on the road. The study suggested that increase of ASET can be best solution without additional escape route, therefore alternative design methods suggested on the base of simulation results. Finally the study shows alternative methods can give good result in terms of evacuation performance evaluation. The evacuation performance evaluation helps the decision-maker to determine the preferred alternatives or upgrades to existing tunnel infrastructure and other measure to meet safety objectives. Finally, the study details the effectiveness of measures the can be taken to reduce the risk of incidents in subway tunnels.

**Keywords** : RSET & ASET, Computer Simulations, Smoke Ventilation Chimney, Egress Performance Evaluation

**요 지** 대구지하철 방화사건 이후 방재시설이 많이 개선되었지만 아직 인명안전에 대한 확실한 대안을 제시하지 못한 상태이다. 본 논문은 전동차 화재 시 인명안전의 보장을 입증하는 방안에 대하여 정량적으로 평가한 논문으로 화재 열차가 터널 내에 정차할 경우를 가정하여 시나리오를 구성하고, 최악의 시나리오에 대한 가상 화재 및 피난시물레이션 기법을 활용하여 대피안전성을 평가하였다. 평가결과 현행 지하철 터널구조하에서의 인명안전을 확보하기 위해 승강장(스크린 도어 설치)에서는 터널상부에서 승강장 천정부를 연결하는 제연환기구(덕트 포함)를 설치할 경우, ASET시간을 연장할 수 있기 때문에 대피안전성 확보가 가능하다. 또한 터널중앙 환기구에서는 배기통과 완전히 분리된 별도의 특별 피난계단을 연결하여 설치하여야만 터널 중앙환기구를 통하여 대피하는 승객의 대피안전성의 확보가 가능한 것으로 입증 제시한바, 실물화재실험의 수행없이 가상화재시물레이션에 의하여 대피안전성을 정량적으로 입증하였다.

**주요어** : 필요피난시간 및 가용피난시간, 컴퓨터 가상화재 및 피난시물레이션, 제연환기구, 대피안전성 평가

† 책임저자 : 정회원, 경원대학교 소방방재공학과, 부교수  
E-mail : firepark@kyungwon.ac.kr  
TEL : (031)750-5715 FAX : (031)750-8749  
\* 비회원, 한밭대학교 건축설비공학과, 교수  
\*\* 정회원, 경원대학교 건축공학과, 부교수  
\*\*\* 비회원, (주)상보기술단 지반사업부, 이사

## 1. 서론

### 1.1 지아터널에서의 방재성능 중요성

대구지하철방화참사는 화재열차가 역 승강장에서 정차하였으나 기관사가 화재발생사실을 인지하지 못하여 전동차의 문을 상당한 시간 동안 개방하지 않아 많은 승객이 전동차를 제때에 탈출하지 못하여 화염에 휩싸여 사망하였거나, 뒤늦게 전동차의 문을 수동으로 개방 후, 빠져 나온 후에 승강계단을 통해 탈출하다가 뒤따라 오는 연기에 질식사하여 사망한 것으로 조사되었다. 따라서 많은 방재시설이 역사의 승강장 또는 대합실 등을 중심으로 개선되었지만 터널의 경우에 있어서 역사와 비교하여 아직 체계적으로 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 터널화재 시나리오의 대표적인 상황인 터널내 화재열차의 정차 상황을 기반으로 대피승객의 인명안전을 최우선으로 고려한 방재성능의 개선이 시급하다.

터널내 화재열차가 정차시 승객들은 터널에서 하차하여 인근에 있는 역으로 신속히 이동하여 외부로 탈출하여야만 피난이 완료된다. 궤도가 설치되어 있는 철도터널의 대피 행위는 장애물이 많기 때문에 터널내 조도가 낮을 경우 상당히 불리하다. 또한 대피가 진행되는 과정에 터널 내 연기확산에 의한 오염이 발생할 경우 인명피해의 발생이 필연적으로 수반될 가능성이 크다. 이러한 피난장애 발생가능성을 사전에 검토하여 인명안전을 확보하기 위해서는 피난시설의 보강이 필수적일 뿐 아니라 보강된 피난시설을 기반으로 대피안전성을 평가하여 방재시설에 대한 안전성을 검토할 필요가 있다.

## 2. 도시철도터널의 방재성능 분석

### 2.1 현행도시철도 지아터널의 방재시설 현황

#### 2.1.1 대피통로 현황

국내 대부분의 지하철 구간의 터널은 지하역사와 지하역사를 연결하는 지하터널이 대부분으로 통행방식은 복선교행 터널구조로 구축되어 있다. 이 터널의 연장범위는 800m~1200m 범위의 장대터널이 대부분이나 터널의 내부 공간에서 외부의 지상도로로 탈출 가능한 대피통로가 없는 구조이다.

따라서 터널내 열차의 정차가 이루어져 대피승객이 외부로 탈출할 수 있는 방법은 터널의 양단부에 위치한 승강장을 통하여 역사의 지상출구로 나가는 것뿐이다. 최근에 들어 대피통로의 부족에 따른 해소차원으로 터널중앙부에 있는 환기구를 비상통로로 겸용하도록 개조하여 대피승객을 유도하는 설계안을 제시하는 등 노력을 하고 있지만, 비상시에는 연기의 배출이 환기구를 통해 동시에 이루어지기 때문에 인명확보를 보장할 수 없어 이 시스템에 대한 방재성능의 평가를 정확하

게 할 수 없는 실정이다.

#### 2.1.2 복선교행터널의 대피로 현황

현행 복선교행터널의 단면을 살펴보면 궤도의 양측부의 공간이 아주 협소하고 비상보행로의 폭이 좁아(500mm) 유지보수용 인원의 출입만 허용하도록 설계되어 있어 화재열차 정차시 대피승객의 정상적인 피난보행이 불가능한 상황이다. 따라서 양측부 통로는 매우 협소하기 때문에 정상적인 대피로로 사용할 수 없다.

또한 복선교행터널 구조상 양궤도간 중앙부에 있는 여유공간은 양측부 비상보행로보다 넓어(약 800mm) 대피로서는 어느 정도 사용이 가능하다. 물론 정방형 구조인 경우 중앙부에 기둥이 위치하고 있어 대피가 불가능한 경우도 있지만 반대선 열차의 운행중단이 확실시 되는 경우 대피로로 사용할 것으로 판단된다.

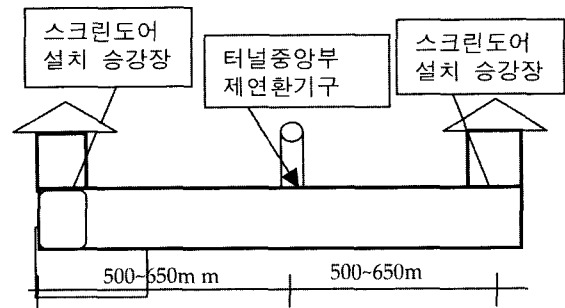


Fig. 1. Longitudinal section of a subway tunnel(exiting standard)

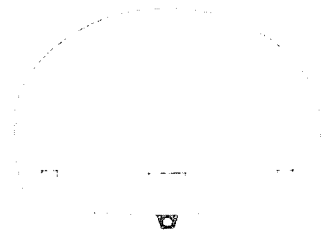


Fig. 2. Cross section of a subway tunnel(exiting standard)

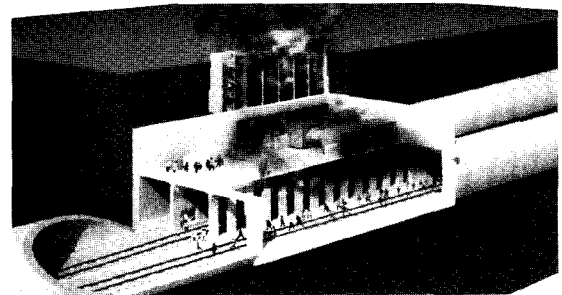


Fig. 3. A perspective drawing showing that smoke is contaminating egress stairs in extract air towers

### 2.1.3 중앙환기구의 연기 배출현황

터널 중앙에 위치한 중앙환기구는 터널내부로 외부의 신선한 공기를 집어넣기 위한 급기의 목적으로 주로 설치하는 환기기로 강제식 급기 팬이 설치되어 있고 공기를 취급하기 위한 급기통이 지상으로 노출되어 있는 구조이다. 급기통 내부에는 간이철제계단이나 돌음계단을 부착하여 유지보수인원의 입출입을 용이하게 도모하도록 설계하는 것이 보통이다.

터널 화재시 터널상부로 확산되는 연기는 급기통을 통하여 배출되므로 대피 승객의 안전에 위해를 가하는 상황으로 돌변할 수 있으므로 현재 대피통로로 사용하는 데에는 우려가 크다.

## 2.2 현행 도시철도시설의 대피안전성평가

### 2.2.1 필요안전대피시간(RSET)의 산정

#### 1) 필요안전대피시간(RSET)의 산정 의의

열차의 열차탑승객이 터널 외부로 탈출하기 위해 최소한으로 필요한 시간을 RSET이라 정의하며 정확히 표현하면 착화 후 열차에서 하차한 후 터널내 대피로를 따라 연기로부터 방호가 가능한 안전구역(일반적으로 대피통로나 터널 입·출구부를 말함)까지 도달하는데 필요한 시간을 지칭하는 용어로 필요안전 대피시간(Required Safety Egress Time)의 약어이다.

터널의 RSET( $T_{RSET}$ )은 최장피난소요시간이 요구되는 단일피난경로의 RSET이 선정되며 단일 피난경로의 RSET은 피난개시시간과 피난이동 시간의 합으로 다음과 같은 식으로 산정 가능하다.

$$T_{RSET} = \sum (T_{pre} + T_{tr})$$

여기서  $T_{pre}$ 는 피난개시시간(Time for Pre-movement)으로 화재발생 후 피난자가 인지하는 데 소요되는 시간과 화재인자 후 행동을 개시하는 데 소요되는 시간 (통계적으로 약 60초에서 120초가 소요되는 것으로 조사됨)을 말한다.

$T_{tr}$ 은 피난이동시간(Time for Movement)으로 피난개시 후부터 피난을 종료하는데 걸리는 시간으로 피난보행시간과 개구부 유출시간의 합을 말한다 ( $T_{tr} = T_w + T_f$ ). 피난이동시간은 터널속에서 대피장애가 발생하지 않고 유도등, 대피로 표식판 등 비상시의 피난장구나 시설이 설치된 피난경로하에

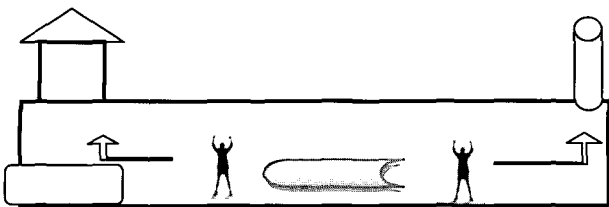


Fig. 4. Egress paths and evacuation directions in a subway tunnel

서 이동하는 속도를 가지고 산정한다.

상기의 RSET 산정식을 수계산으로 할 경우 매우 복잡하고 연속하여 일어나는 피난의 과정에 따른 소요시간을 정확히 계산하기가 어렵기 때문에 국제적으로 공신력이 큰 피난소프트웨어를 사용하여 컴퓨터로 산정하는 것이 보통이다.

기존의 터널구조는 모든 단면이 복선교행 터널로서 화재열차에서 하차한 승객이 터널 좌우측 대피로를 보행하여 인근의 역사의 승강장을 통하여 지상으로 대피하는 것이 제일 일반적인 시나리오로서 설정 가능하다. 현행 도시철도의 사례로서 서울지하철 2기, 즉 2호선의 승강장과 터널의 표준으로 삼아 가상시뮬레이션을 수행하였다.

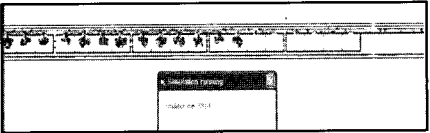

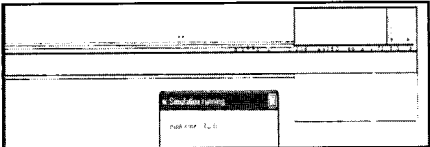
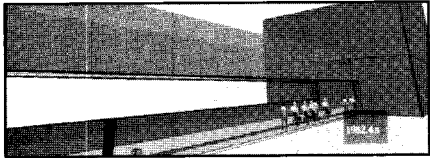
- 터널 중앙부에서 역사까지의 평균 대피거리
  - 출발역과 도착역 간 터널길이가 평균 1200m이므로 평균 수평대피거리는 약 600m임
  - 수직대피거리는 역사에서 지상으로 나가는 출구까지의 수평투영거리를 10m로 지하4층을 평균높이로 할 경우 약 40m 기준
- 가용 대피로의 산정
  - 복선교행터널은 양궤도간 중앙공간(폭 800mm)이 대피로로 가용하나 측부의 공간은 폭이 매우 좁아(약 500mm이내) 사용 불가
  - 현재의 복선교행터널은 양방향 운행궤도가 설치되어 있으나 받침 목 및 레일의 높이가 커 궤도구간을 피난로로 사용하기에는 부적합함
- 대피대상인원 산정 및 피난방향결정
  - 운행 열차의 견인전동차가 전체 6량에서 12량까지 연결하여 운행하는 것이 보통이나 평균적으로 8량이 적합(8량 정원기준, 970명)
  - 복선교행 터널에서 승객의 대피방향은 전동 차의 전후 양방향으로 진행하므로 좌우 각각 일방향 피난대상인원은 전체 인원의 1/2로 선택(일방향 485명 선택)

#### 2) 피난시뮬레이션 수행에 의한 RSET 결정

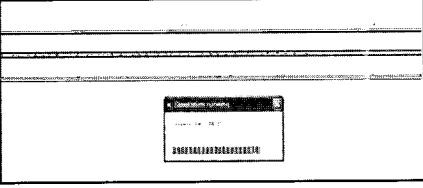
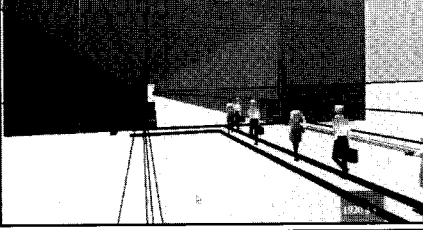
RSET의 산정을 국제적으로 공신력이 큰 피난소프트웨어인 그리드 플로우(Grid-Flow)를 사용하여 산정한 결과 환기구 또는 승강장 대피경로별로 다음과 같이  $T_{RSET}$ 이 예측되었다.

- 피난개시시간( $T_{pre}$ )은 90초로 설정
- 피난이동시간( $T_{tr}$ )은 시뮬레이션 결과 안전 구역인 환기구의 입구에 모든 승객이 진입 완료하는 시간으로 2000초로 산정되었으며 승강장으로 대피 완료하는 시간이 1920초로 산정되었다.
- $TRSET$ 은  $T_{pre}$  와  $T_{tr}$ 의 합임

**Table 1.** Real time status by egress simulation result in the tunnel center air tower

90초 -평면	 (전동차 개문 후 승객 탈출현황)
90초 -입체	 (터널 중앙 대피로 보행현황)
1982초-평면	 (터널 중앙환기구에 거의 도착)
1982초-입체	
$T_{RSET}$	$T_{pre} (90초) + T_{i,r} (1982초)$

**Table 2.** Real time status by egress simulation result in the platform

1920초경-평면	 (승강장으로 승객대피 거의 완료)
1920초경-입체	
$T_{RSET}$	$T_{pre} (90초) + T_{i,r} (1920초)$

**2.2.2 가용안전대피시간(ASET) 산정**

**1) 가용안전대피시간(ASET)의 산정 의의**

가용안전대피시간(ASET)은 일정한 구획 공간이나 장소에서 연기, 유독성가스 등이 확산되거나 침투되어 거주자가 피난을 할 수 없을 정도까지 오염되는 시간을 말하며 터널 내에

서는 화원에서 일정거리에 있는 구역에 연기가 확산되어 거주역(바닥에서 1.5m상단)까지 확산되는 시간을 그 구역의 가용안전 대피시간(Available Safety Egress Time), 즉 ASET시간이라고 지칭하며, 화원에서 그 구역까지 연결되는 모든 공간은 사용불가상태(Untenable Condition)라고 단정할 수 있다.

철도터널의 ASET을 체크하는 지점은 인명피해가 많이 발생 가능한 공간이나 지점을 중심으로 산정하는 데, 연기오염이 발생하여 인명피해가 클 것으로 예상되는 지점으로 열차의 양단부, 대피통로 또는 터널 입출구부의 인근공간(약30~50m지점)이나 아주 긴 터널의 경우 피난자의 후미가 확산하는 연기에 의해 추월되는 지점에서 측정하는 것이 일반적이다. 즉 본선터널의 일정지점에서 연기가 오염될 때 사람이 생존 가능 여부를 가지고 결정하는 것이 통례이다.

터널 내에서 확산하는 연기가 인명에 미치는 영향은 화원에서 방출되는 연소생성물인 연기가 터널 내에서 다음과 같은 인자를 가지고 확산하기 때문에 다음 영향요소를 기준으로 연기의 확산을 판단하여야 한다.

- 연기의 질량유속
- 연기의 온도(temperature)
- 연기나 화재가스의 속도(velocity of smoke and hot gas)
- 발생 연기량(volume of smoke)
- 연기의 광학농도(optical density)
- 유해가스의 발생량(toxic gases)

연기유동 분석을 수행하는데 불확실성이 너무 많기 때문에 아주 단순한 방법으로 측정하는 방법이 오히려 신뢰성이 크다. 많이 사용하는 측정방법이 바로 체크 공간의 평균 온도를 이용하여 연기의 확산을 나타내는 방법이다. 다만 연소 초기에는 연기가 터널내 기류를 따라 유동하고, 터널의 양 출구방향으로 균일하게 확산한다고 가정하면서 터널내부의 기류 상존여부에 따라 변하는 것으로 추정한다. 즉 기류가 1m/s로 흐른다면 연기는 공기와 섞여 동질의 공기혼합물(homogeneous mixture)인 동일성층을 이루면서 하부의 저온 공기층과 구분되어 기류방향으로 확산되고, 이 층은 유체에 의해 형성되는 유체성층의 직경보다 약 10~20배 정도의 큰 거리까지 성층을 형성하면서 확산된다(Bergqvist, 2001). 여기서 말하는 유체성층의 직경( $Dh$ )는 다음 식으로 정의된다.

$$Dh = \frac{4A}{P}$$

여기서  $A$ = 터널 내공단면적( $m^2$ ),

$P$ = 터널 내공단면의 길이

상기 식에서 일정한 가정하에 일정시간대의 연기온도를 표시

하면 다음 식으로 간략하게 나타낼 수 있다(Bergqvist, 2001).

$$T_g(t) = T_0 + \frac{0.7Q(t)}{\mu\rho_0Ac_p}$$

- 여기서  $T_0$  = 터널의 초기온도(대류온도, °C)
- $u$  = 터널내 기류풍속(m/s) (기류풍속이 1m/s일 때 환기성능에는 부정적 영향을 줌)
- $\rho_0$  = 터널내 공기밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $C_p$  = 1KJ/°C.kg 공기
- $Q(t)$  = t 시각의 설계화원의 열방출속도(MW)

연기농도는 화원에서 떨어진 거리  $x$ 와 경과시간  $t$ 의 함수(Bergqvist, 2001)에 따라 하강하는 것이 통례이다.

$$T_g(x,t) = T_0 + [T_{g,0}(\lambda) - T_0] e^{-\frac{hP_x}{\rho_0 u C_p}}$$

- 여기서  $\lambda = t - (x/u)$  (환기풍속  $u$  가지고 거리  $x$  만큼 연기를 이동시키기 위한 지연시간)
- $h$  = 터널구조 표면에서의 열손실 계수  
 $= 0.03 \frac{kw}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- $P_x$  = 터널의 내공표면길이(m)

피난시나리오에 의해 선택되는 단일피난경로를 중심으로 화재시나리오에 따라 연기확산 및 연기하강이 일어나는 시간인 ASET이 선정되는 데 비교적 많은 변수가 고려되어야 하기 때문에 전산수치해석(Computational Fluid Dynamics) 응용 화재시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 산정한다.

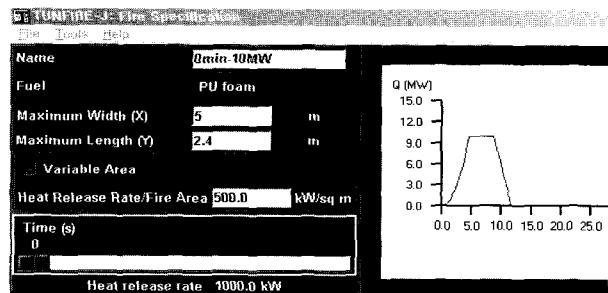
CFD 화재 및 연기유동 소프트웨어는 화염의 확산과 연기의 유동을 나타내는 여러 가지 효과를 고려하면서 공학적으로 구현되어야만 국제적으로 신뢰성을 가질 수 있다. 특히 화재시뮬레이션에 의한 연기유동의 결과는 단순한 방법인 연기유동에 따른 온도변화를 가지고 판단하여도 실제의 연기유동과 크게 다르지 않다.

## 2) 시뮬레이션 수행에 의한 ASET의 산정 결과

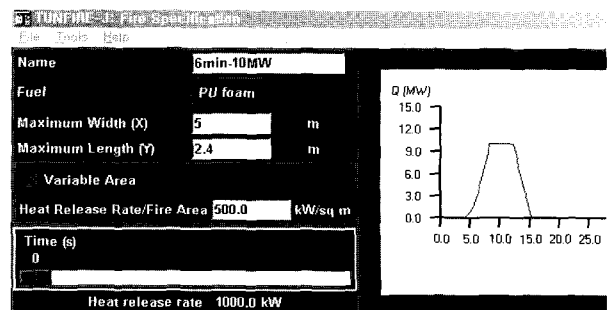
ASET의 산정을 국제적으로 공신력이 큰 CFD 화재 소프트웨어인 Jasmine Tunfire (영국 BRE 제작)를 사용하여 다음과 같은 화재시나리오에 근거하여 산정한 결과 중앙 환기구에서는 약680초, 승강장은 900초로 예측되었다.

- 설계화원의 강도 및 에너지 값 결정
  - 지하철에 운행중인 전동차는 난연, 극난연 처리가 된 것을 기준으로 함

- 주요 가연물은 차내 내장재로서 폴리 우레탄폼과 섬유강화플라스틱(FRP)을 기준으로 최대 열방출속도를 10MW로 함
- 국내 전동차의 가연물 총량을 열량값으로 환산하여 약 65,000MJ로 함
- 화원의 성장속도 및 화원의 최대면적
  - 열방출속도식,  $Q(t) = at^2$  에서  $k$ 값을 FAST(150초)로 선정하여  $a$ 값을 0.0469로 함
  - 화원의 최대면적은 연료 지배형 화재(플래시 오버 이전)에서 12m<sup>2</sup> (2.4m x 5m)로 가정
  - 열방출비속도는 화재화원면적당 HRR 로서(Q/A<sub>f</sub>) 값이 0.1보다 크고 2.5보다 작은 범위에 들어야 하는 데, 그 값이 0.833(10MW/12m<sup>2</sup>)이므로 적절함
- 화원의 위치 및 화재전이 여부
  - 터널 내 화재열차의 위치는 정 중앙부로 하여 양방향 피난시 동일한 시간내 안전구획으로 탈출하는 것으로 설정
  - 8량 전인열차에서 화재차량을 4호차로 하여 인접차량으로만 화재전이가 6분 후에 일어나는 것으로 가정
- 터널 환경 설정
  - 터널의 대기평균온도는 20도로 함
  - 터널의 자연풍 기류는 상존하지 않는 것으로 가정하며 초기 열차풍 또한 수분 이내 소멸하기 때문에 무시함
- 정차후 후속열차 진입여부



(최초 착화열차의 설계화원 입력자료)



(화재전이시 인접열차의 설계화원 입력자료)

Fig. 5. Input data for design fires about subway train

- 터널내 정차후 자동차단장치에 의해서 교행 열차는 터널 내 진입하지 않는 것으로 함
- 후속 열차 또한 궤도내에 설치된 자동이격거리 유지안전 장치에 의해서 터널 내에는 자동적으로 진입하지 못하는 것으로 함

실제화재에 있어서는 화재의 규모와 함께 화재의 발달성상도 중요한 요소로 작용하며, 화재가 최고조 점( $Q_{peak}$ )에 이르

Table 3. Summary of design fires about various trains(NFPA 502)

구분	적요	화원 면적 [m <sup>2</sup> ]	화재 강도 [MW]	방출열량 [GJ]	발연 속도 [m <sup>3</sup> /초]	도달 온도 [°C]
Metro 전동차		12	10~15	65	40~60	600
여객철도 차량		20	40~50	90	70~90	1,100
고속철도 차량		18	35~45	88	60~80	1,000

Table 4. smoke movement results by smoke simulation(tunnel center air tower)

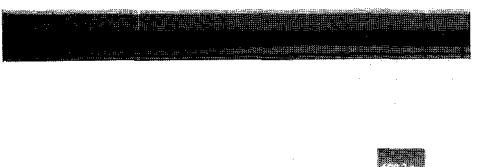
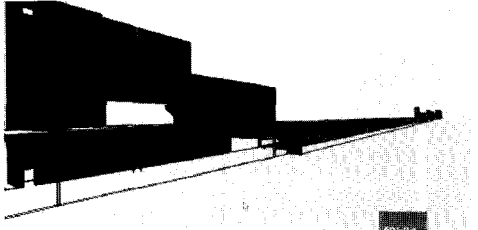
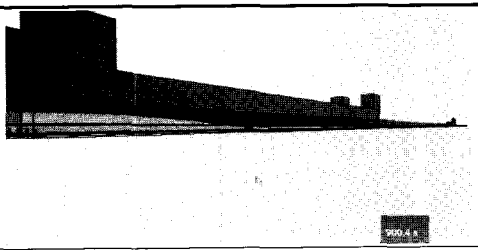
600초	
결과	열차의 후미 또는 선도차량을 오염시키는 연기확산 진행 (차량의 ASET)
680초경	
결과	환기구의 돌음계단으로 연기침투 발생 (환기구의 ASET)

Table 5. smoke movement results by smoke simulation(platform)

900초경	
결과	승강장의 승강계단으로 연기침투 발생 (승강장의 ASET)

기까지의 시간경과에 따른 우레탄 폼의 화재성장속도를 기준으로 시뮬레이션을 수행한 결과 Table 4와 같이 예측되었다.

상기 Table 4의 결과와 같이 환기구의 돌음계단으로 연기가 오염되는 시간을 기준으로 가용안전대피시간(ASET)을 산정한 결과 환기구의 ASET은 680초로 예측가능하며, 승강장의 경우 승강장의 승강계단(대합실 연결계단)의 오염시간을 기준으로 할 때 약 900초를 승강장의 ASET 시간으로 설정 가능하다. 여기서 승강장의 ASET이 환기구의 ASET보다 오래 걸리는 이유는 비록 화재열차로부터 떨어진 거리(약 600m)는 동일하더라도 승강장의 길이가 환기구보다 상대적으로 길고, 승강계단이 2개이기 때문에 승강장의 ASET이 좀 더 오래 걸리는 것으로 판단된다.

### 2.2.3 RSET vs. ASET에 의한 대피안전성 평가

#### 1) 평가결과

2.2.1에서 산정한 RSET시간을 2.2.2에서 산정한 ASET시간과 비교할 경우 환기구와 승강장 지점의 연기 확산에 오염 발생 시간이 필요한 소요대피시간보다 상당히 빠르게 진행되는 점을 쉽게 알 수 있다. 이렇게 ASET이 RSET보다 빠를 경우 대피승객의 치사율이 발생하는데 거의 75%이상의 치사율에 도달할 것으로 예측된다. 특히 현행 지하철 터널의 대피안전성은 약 75%정도의 치사율을 가지는 것으로 평가되므로 인명피해를 제로(zero)화 하기 위한 개선이 시급하다고 결론 지을 수 있다.

특히 현행 지하철 표준터널은 대피안전성이 아주 부적합하기 때문에 만에 하나 화재발생 열차가 터널의 중앙부에서 정차할 경우 많은 인명피해가 예상된다는 점을 정량적으로 입증 한다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

Table 6. Summary of evacuation performance assessment

적요	구분	터널중앙부 환기구/승강장 대피상황	비고
피난 경로	RSET	2,072초/2,010초	
	ASET	680초/900초	
비교	RSET vs. ASET	2,072초/680초(환기구) 2,010초/900초(승강장)	2.5~3배
		대피안전성 매우 낮음	

## 2) 개선방안의 적정성

이런 부적합한 대피안전성 평가 결과를 해소하고 개선하기 위해 필요한 방재개선방안을 강구하는 데 있어서 필요안전대피시간 (RSET)의 단축방안이 가장 효과적이면서 확실한 자력구조(Self-Rescue) 성능을 확보할 수 있다.

그러나 지금의 경우와 같이 대피안전성, 즉 ASET 대비 RSET이 초과할 경우 대피통로의 신설이나 대피로의 확장 등에 의한 대피안전성 개선방안은 현행터널의 구조 또는 단면의 변경이 수반되므로 사실상 적용하기 불가능하다. 이 점은 논란이 있을 수 있으나 경제적인 면과 도로면에 터널로 통하는 출입구를 돌출시킨다는 점에서 현 시점에서 적용 불가능한 방안으로 판단된다.

따라서 구조의 수반이 거의 없는 설사 있더라도 단면이나 구조의 변경을 극소화 하는 방안이 적용되어야 한다. 결론적으로 대피통로간 간격이 600m이상인 현행 지하철 복선교행터널에서는 필요안전대피시간(RSET)의 단축을 도모하는 방안보다 가용안전대피시간(ASET)의 연장을 도모하는 방안이 경제적이면서 현실적이라는 점을 간과할 수 없다.

## 3. 도시철도터널의 방재성능 개선방안

### 3.1 현행도시철도터널의 가용안전대피시간(ASET) 연장방안

현행 도시철도터널에서 ASET 시간의 연장을 도모하기 위한 방안은 연기의 오염을 지연시키는 방안이 가장 효과적이다. 가장 흔한 방안이 터널상부에 배연구를 많이 만들어 연기를 직접 터널외부로 배출하여 연기의 확산이나 하강을 지연시키는 방안이 가장 효과적이지만, 배연구를 신설할 경우 터널상부 도로면 외부로 연통을 노출시켜야 한다는 점에서 한계가 있다. 따라서 터널의 단면이나 구조의 미세한 변경을 수반하지 않으면서 연기를 외부로 효과적으로 배출할 수 있는 시스템을 강구하면 다음과 같이 열거할 수 있다.

- 환기구의 환기통을 전용 배기통으로 구축하고, 대피자의 외부탈출이 가능한 방화방연피난계단의 별도신설방안
- 승강장과 연결되는 터널상부의 연기배출 챔버(Smoke Chamber) 추가방안

상기 안은 구조물의 변경이 크게 수반되지 않으면서 기 설계되어 있는 환기구나 승강장 터널의 구조를 약간 변경하여 연기를 효율적으로 배출 할 수 있는 방안이다. 이런 방안이야말로 적은 예산으로 ASET을 효과적으로 연장할 수 있는 방안이므로 이들 방안의 방재성능 향상효과를 정량적으로 입증할 필요가 있다.

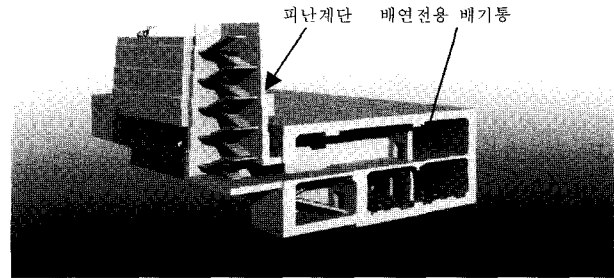


Fig. 3. Concept drawing showing egress only stair near air tower at the center of tunnel

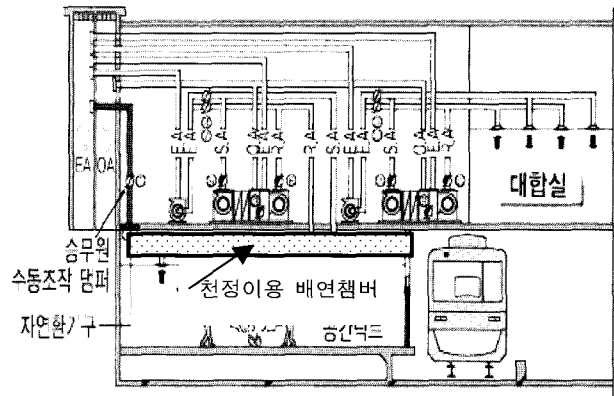


Fig. 4. Concept drawing showing smoke chamber or ducts using ceiling area connection platform and tunnel

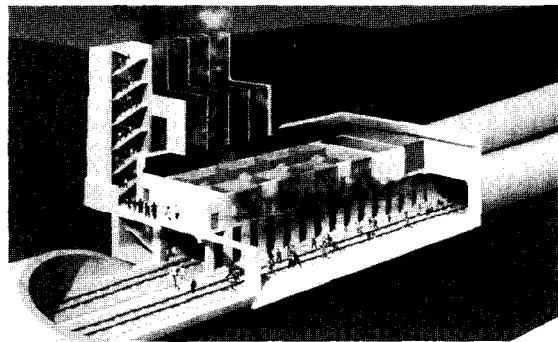


Fig. 5. Alternative drawing showing egress only stair attached in air tower (people for stair, smoke for air tower)

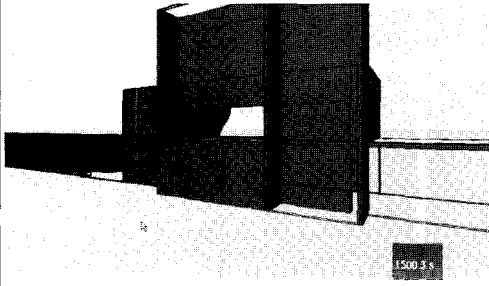
### 3.2 ASET 연장방안의 성능 평가

#### 3.2.1 환기구의 연기배출전용 배기통 구축 및 별도 피난계단 신설 방안

##### 1) 방재성능의 개선현황

현행 환기구의 구조는 외부와 연결된 배기통에 돌음계단 (spiral stair) 또는 사다리형 계단(ladder stair)인 비상계단을 설치하여 유지보수인원의 출입을 도모하면서 비상시 외부 탈출계단으로 이용하는 구조로서 화재시 연기의 배출과 함께 대피승객의 탈출경로 겸용되는 단점이 있는 구조이다. 이런

**Table 7.** Evacuation performance assessment for alternative method in case of use of air tower with egress only stair

구분	복선교행터널 개선안의 대피안전성(환기구)
적요	
RSET	2,072초
ASET	ASET중앙환기구의 배기통으로 연기가 1900초경부터 오염-3,000초 이상 
평가	복선교행터널의 대피통로간 간격이 600m일 경우 RSET이 ASET 보다 적어 대피안전성 양호

구조에서는 연기가 환기구의 배기통으로 침투하는 시점에서 인명피해가 발생하므로 이 시점에서 ASET이 결정되는 반면에, 개선한 방안에서는 배기통에 있는 계단을 제거하고, 별도 분리된 피난계단을 신설하기 때문에 환기구의 배기통의 오염이 발생하더라도 상당한 시간 동안 인명피해를 방지할 수 있다. 결과적으로 연기는 배기구를 통하여 외부로 빠져나가고 대피승객들은 연기오염방지가 되어있는 피난계단을 통하여 외부로 탈출하므로 ASET은 연장될 수밖에 없는 구조로 변경된다.

**2) 화재시물레이션에 의한 ASET 연장효과 분석**

환기구의 비상대피통로 신설에 의한 연기배출전용 배기통을 구축할 경우 전장과 동일한 시나리오에 의해 시물레이션을 수행한 결과 ASET은 3,000초 이상으로 연장되었음을 입증하였으며, 기존의 RSET 시간(2,072초)과 비교하여 대피안전성을 평가한 결과 인명피해가 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

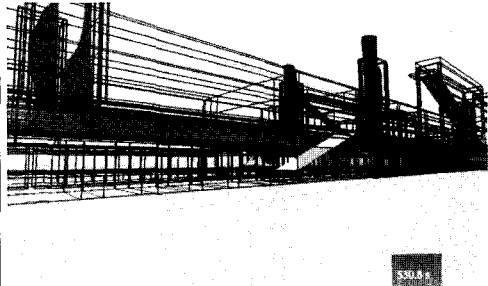
**3.2.2 승강장 연결터널상부 배연챔버 신설방안**

**1) 방재성능의 개선현황**

현행 승강장 터널구조는 열차풍으로 인한 압력을 저하시키기 위해 승강장 천정부에 운행터널과 만나는 접합부에 배기덕트를 설치하여 열차풍을 배출시키는 시스템을 설치하고 있으나 단면적이 좁아 비상시 연기를 배출하기에는 부적합한 구조로 되어있다.

이런 구조를 배연에 효과적으로 작용하도록 덕트가 설치된

**Table 8.** Evacuation performance assessment for alternative method in case of use of air tower with egress only stair

구분	복선교행터널 개선안의 대피안전성(승강장)
적요	
RSET	2,010초
ASET	중앙환기구의 배기통으로 연기가 1900초경부터 오염-3,000초 이상 
평가	복선교행터널의 대피통로간 이격거리가 600m 이내 일 경우 RSET이 ASET 보다 적어 대피안전성 양호

공간을 배기챔버(Chamber)로 변경하고 비상시 연기의 체류 공간으로 활용할 경우 연기의 배출을 용이하게 유도할 수 있다. 본선터널의 상부천정부를 따라 승강장에 도달한 연기를 배기챔버를 통하여 축적시키면서 챔버와 연결된 배기통을 통하여 외부로 연기를 배출시킬 경우 승강장 지점의 ASET을 연장할 수 있다. 이 방안의 방재성능에 대한 효과를 가지적으로 입증하여 대피안전성을 평가할 필요가 있다.

**2) 화재시물레이션에 의한 ASET 연장효과 분석**

승강장의 천정부를 배기챔버로 구축하고 배기통을 연결후 외부로 연기를 배출하는 승강장 천정부 배기챔버 구축방안을 대상으로 전장과 동일한 시나리오에 의해 시물레이션을 수행한 결과 ASET은 3,000초 이상으로 연장되었음을 입증하였으며 기존의 RSET 시간(2,072초) 기준으로 대피안전성을 평가한 결과 인명피해가 발생하지 않는 것으로 평가되었다

**3.2 평가 결과**

ASET연장방안에 의한 대피안전성 평가결과 두 방안모두 양호한 것으로 평가되었다. 지금의 현행 지하철 터널과 같이 대피통로간 연장이 600m정도인 별도의 대피통로 없이 연기의 배출을 용이하게 도모하는 방법으로도 대피안전성을 확보할 수 있다는 결론을 정량적인 방법을 사용하여 도출하였다.

**4. 결론**

본 연구는 현행 도시철도터널의 대피안전성을 기반으로 시



설물의 경제성을 편익이 아닌 비상시의 안전성을 추정하여 평가하였다. 본 연구에서 평가한 안전성을 정성적이 아닌 정량적으로 산출 가능한 수치, 즉 인명피해를 구체적으로 나타내는 대피안전성을 기반으로 평가를 진행하였다. 본 연구에 사용한 대피안전성 평가방법은 터널내 발생 가능한 최악의 화재시나리오에 근거하여 인명피해를 제로화(Zero)하는 방안을 강구하는데 목표를 설정하되 큰 비용을 들지 않는 방안으로 그 범위를 좁혀 실효성을 극대화하는 방법으로 진행하였다. 결론적으로 대피거리가 300m(대피통로간 간격 600m이고, 역사간 터널연장 1200m이상) 이상인 현행 도시철도터널은 단면구조가 복선교행터널로서 대피통로의 추가신설방안은 고비용이 들 수 밖에 없는 구조이므로 RSET의 단축방안은 실효성이 낮다. 따라서 본 연구에서는 저 비용구조로서 실효성이 높을 것으로 판단되는 ASET연장방안에 대하여 시뮬레이션에 의한 기법으로 산정한 ASET과 RSET의 대비로 대피안전성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 첫째, 터널의 환기구 방향으로 확산되는 연기를 배연전용 배기통으로 배출하고 승객 대피용 피난계단을 신설하여 배기통과 분리할 경우 ASET/RSET수치가 1이하로 낮아져 치사율이 제로화에 도달하였음을 정량적으로 평가하였다.

둘째, 터널에서 인접 역사의 승강장방향으로 확산되는 연기를 승강장으로 확산시키지 않고 승강장의 천정 상부챔버를 만들어 챔버를 통하여 승강장 배기통으로 연기를 배출할 경우 ASET/RSET수치가 1이하로 낮아져 치사율이 제로화에 도달하였음을 도출하였다. 이와 같이 도시철도 터널의 연기를 외부로 효과적으로 배출하는 구조를 채택할 경우 대피안전성이 확고히 보장됨을 정량적으로 평가하였다

그러나 다음과 같은 점에서 연구의 한계가 존재한다. 첫째 ASET과 RSET의 산정에 영향을 미치는 요인 즉, 시뮬레이션 소프트웨어의 성능과 시나리오의 적정성에 관한 논쟁의 여지가 있음을 부인할 수 없다. 단 본 연구에서는 국제적으로 인정을 받아 널리 사용되는 시뮬레이션 프로그램을 활용하였으며 시나리오 또한 ISO기준에 설정한 합리성에 기초하여 수립하였다는 점에서 의의가 있다고 볼 수 있을 것이다. 둘째 시뮬레이션에 의한 대피안전성의 확보가 실제의 화재상황에서 인명피해를 100퍼센트 막을 수 있다는 것과는 구분할 필요가 있다. 이 방법은 평균적인 피난능력과 정상적인 연기발생량에 근거하여 가상의 비상상황을 설정한 것인지 실제로 일어날 수 있는 모든 경우(테러 또는 조직적 방화사건 등)를 포함하는 시나리오와는 구별할 필요가 있다.

## 참고 문헌

1. Geoff Cox and Suresh Kumar, "Modeling Enclosure Fires Using CFD", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, 2002.
2. Ronald Barham, "Fire Engineering and Emergency Planning, E&FN SPON, 1995.
3. Klaus Kruse, "Fire And Disaster Control", Deutsche Bahn AG, 2002.12.
4. John H. Klotz, "Design Manual For Smoke Control Systems", 1991.10.
5. 박형주, 서울특별시 도시철도공사, "도시철도공사 고심도 및 환승역의 화재영향평가", 2005. 12.

(2007년 9월 20일 논문접수, 2007년 10월 16일 심사완료)