

지하철 터널에서의 제연

Smoke control in subway tunnels

차 철 현
C. H. Cha
(주)대양공조주식회사



- 1953년생
- 건축설비 및 지하공간의 생존 환경에 대한 환기시스템과 유체유동, 열환경에 관심을 가지고 있다.

김 진 국
J. K. Kim
방재시험연구소



- 1964년생
- 건축물의 제연설비 성능평가와 시뮬레이션 관련 업무를 수행하여 왔으며, 현재는 터널의 제연성능평가 시뮬레이션에 대하여 관심이 있다.

1. 머리말

국내의 경우 소방시설을 설치하여야 할 소방대상물과 그 설치 및 유지에 관한 기준은 소방법에 정하고 있으며, 그 내용은 표 1과 같다. 지하철과 같은 궤도차량용 터널인 경우 소방법 상의 시설물에 대한 규정을 두고 있지 않다. 따라서 화재가 발생할 경우 피난, 구조 및 소화활동 등이 적절히 고려되지 않은 상태에서 팬의 제원과 성능이 결정되고 있다. 적절한 환기설비를 갖추지 않는 경우에 화재발생시 대형 인명사고가 발생할 가능성이 높다.

국내 터널의 경우에는 종류식 환기방식을 많이 채택하고 있으므로, 화재가 발생한 경우 피난방향으로 연기가 침투하지 못하도록 적절한 유속이 생성될 수 있는 팬을 설치하여 승객의 안전한 피난과 구조/소방활동의 안전성을 확보하여야 한다.

본 고에서는 터널화재안전의 중요성을 고취하고자 터널화재사례 및 제연에 대하여 소개하고자 한다.

2. 터널의 화재사례 및 분석

2.1 국내 사례

배전반 화재와 같은 단순화재 발생경험은 있지만 대형사고는 보고되고 있지 않다.

2.2 외국 사례

1996년 11월, 영불해협 터널내에서 일어난 화재는 세계적인 대토목 사업으로 화재가 되었던 만큼, 관계자에게 큰 충격을 준 점에서 기억이 새롭다. 일본에서도 1972년 북록 터널 열차화재 및 1979년 동명 고속 자동차 도로 터널 화재의 경험이 있었으며, 그 사고를 교훈삼아 조사연구 및 사

표 1 터널관련 소방법규

법조항	소방법 제 2조 5항	소방법 제 30조 ①항	소방법 시행령[별표.1]
주요내용	“특수장소”라 함은 공연장, 집회장, 식품접객업소, 숙박업소, 의료기관, 학교, 공장 그 밖의 다수인이 출입 또는 근무하는 장소로서 대통령령으로 정하는 장소를 말한다.	특수장소의 관계인은 대통령이 정하는 소방시설을 행정자치부령이 정하는 기준에 따라 설치하고 유지하여야 한다.	지하의 공작물안에 설치되어 있는 점포·사무실 그 밖의 이와 비슷한 시설로서 연속하여 지하도에 면하여 설치된 것과 그 지하도를 합한 것 1. 지하상가 2. 터널 : 지하·해저 또는 산을 뚫어서 차량(궤도차량용은 제외한다) 등의 통행을 목적으로 만든 것

표 2 일본 철도터널의 화재 발생 상황(1976년~1994년)

	방화	질연불량	단격	전선접촉	누전	스파크	발열	담배	기타	합계
열차	6	5	1	1	1	5	0	0	0	19
시설	5	1	0	0	2	1	1	1	1	12

고대책이 추진되었다. 그러나 그 이후 일본에서는 대규모적인 터널 화재가 발생하지 않았고, 터널 화재에 대한 위협의식이 서서히 약화된 듯한 느낌이 든다. 국내에서는 지하철 배전반 화재와 같은 단순 화재가 발생한 경험만 있고 대형화재 사고는 없었지만 지속적으로 통과속도, 통행량 및 적재가연물의 증가 등, 잠재적인 위험성은 오히려 증대되고 있으며, 지하철의 건설은 전국적으로 확대되는 추세이다. 그런데 지하철터널에 대해서는 화재관련 방재설비 설치 규정이 없는 실정이다. 세계적으로도 지하철터널의 화재 사례는 그 수가 극히 적으며, 또한 사례마다 양상이 다르기 때문에 일반화하는 것이 상당히 어렵다. 그러나 앞으로 건설될 지하철터널의 화재에 대하여 준비하기 위하여 과거의 사고사례를 다시 살피는 것이 중요하다고 사료되어 화재 사례의 개요를 소개한다.

(1) 일본의 철도터널 화재 발생원인 분석

일본의 경우 과거 약 20년 동안 일어난 철도터널 화재사고 건수의 추이를 보면, 차량 혹은 고정설비의 개선 등 각종 화재대책이 강구되면서 사고건수는 극히 줄어들었다. 일본의 철도터널의 화재

발생상황을 살펴보면 표 2와 같다. 1976년~1994년까지 19년 동안 27건의 화재가 있었고, 그중 2/3이 열차 화재사고고 나머지 8건은 터널 시설 화재다.

(2) 열차 화재

1972년에 발생한 북륙터널 열차화재 사고이후, 열차화재 대책이 추진되면서 최근 열차화재 사고의 발생 수는 그리 많지 않다. 표 2에 표시하는 20건의 화재사고 중 19건은 지하철도의 터널화재다. 화재원인으로는 방화를 제외하면 전기계통이 많다. 또 발화 발연시의 열차 상태는 주행중이 44%, 역 정차 중이 48%로 보고되었다.

(3) 터널 시설화재

터널 시설 및 지하역사 시설에서의 화재 발생 상황은 1988년 이 외에는 많아야 해마다 1건 정도고, 전원계에 의한 화재 사례가 많은 경향이 보인다.

2.3 해외의 화재사례 개요

본 연구에서는 비교적 큰 피해가 있었던 해외의 터널 공간 내 화재사고 사례를 표 3에 제시하

표 3 해외 주요 터널 화재사례(계속)

발생년월	장 소	화 재 상 황
1968년 1월	영단지하철 日比谷線	六本木~神谷町 간을 주행중인 전차 바닥에서 발연되었기 때문에 승객을 하차시키고 회송중, 운전 불능 상태가 되어 정차했다. 이후 불길이 확대되었으며, 소방대의 소화활동으로 진화되었지만 전차1량이 전소되고 승무원, 소방직원 등 11명이 부상했다. 이 화재의 경우 화재발생 장소가 역과 역 중간이었기 때문에 발화차량과의 연락이 불가능하여 화원확인에 시간이 걸렸다. 또 소방대가 사용했던 자급식 호흡기는 겨우 30분밖에 사용할 수 없었고, 수량도 한정되어 神谷町에서 진입할 수 없다. 소방대의 진입구를 확보하는데 시간이 걸렸다.
1969년 5월	미국 펜센트럴 철도 허드슨강 하저터널 (연장 약4 km)	허드슨강 하저터널로 4량 편성의 통근전차가 화재를 일으켜 운전불능 상태가 되었다. 후속하는 급행전차로 터널밖으로 빠져나왔으며 소방대가 출동하여 소화되었다. 승객 1명이 심장마비로 사망하고 8명이 부상했다.
1971년 3월	프랑스 국유 철도 터널	프랑스 국철로 탱크열차가 터널내에서 하행 화물열차와 충돌하여 폭발 발화되었으며 24시간동안 지속되었다. 하행화물열차의 기관사와 조수가 사망했다.
1972년 11월	국철북록선 북록 터널 (연장 13.8 km)	北陸 터널 안을 주행 중인 침대 급행열차(15량 편성, 승객 약 700명)의 11량째 식당차에서 발화되고 敦賀방향에서 약 5.3km들어선 지점에서 정차했다. 승무원이 소화주려했지만 발연이 극심해서 소화 조짐이 보이지 않아 식당차를 떼어내는 작업으로 이행하여, 11량째와 12량째를 약 60m정도 거리를 두고, 이어서 10량째와 11량째를 떼내는 가운데 가선전선이 정전되면서 운전이 불가능하게 되었다. 이 때문에 승객의 피난유도에 주력함과 동시에 관계 기관이 구조에 나섰지만 터널내에 충만한 연기, 가스 때문에 구출 활동이 극히 어려워졌다. 승객 30명이 사망하고 714명이 부상당했다.
1978년 9월	스페인 국유철도 콘고치나스터널 (연장1.8km)	스페인 국철의 콘고치나스 터널로 서물행 탱크열차(가솔린동 탱크차 13량 편성)가 가선사고로 판단되는 원인으로 정차되었다. 기관사가 터널내 전화로 구조를 요청하고, 전력검사장 등을 태운 구조열차가 도착하여, 정지중 탱크 차로 연결했을 때 폭발을 일으켜, 구조열차에 승차했던 관계자와 탱크열차의 기관사 및 조수 총 7명이 사망했다. 불길은 맹렬하여 소화작업이 극히 어려웠다. 그래서 터널 북쪽에서 700 m 들어간 지점을 콘트리트로 막고 남쪽 갱구에서 대량의 소화제를 투입하는 방법을 동원하여 60시간 후에 겨우 진화되었다.

표 3 해외 주요 터널 화재사례

발생년월	장 소	화 재 상 황
1979년 1월	미국 샌프란시스코만 고속철도 (BART) (연장 5.8 km)	샌프란시스코만 해저터널로 7량 편성의 전차 5량째와 6량째 부근에서 발화되었다. 승객(약 40명)은 승무원들의 유도로, 단선병렬 터널 사이에 설치된 보수갱을 통해 상행선 터널로 옮겨지고 상행선을 진행하던 정기열차에 수용되어 탈출되었으나 17명은 연기 등으로 부상당했다. 소화활동은 전차의 내장재에 다량의 폴리우레탄 등이 사용되었기 때문에 극히 어려웠고, 소방사 1명이 연기에 휩싸여 사망하였고 그 밖에 구조관계자 수십명이 부상당했다. 전차는 5량이 전소하고 1량이 반소, 측벽의 케이블 등에 연소되어 발화 7시간반 후에 점차 진화되었다. 캘리포니아주 공익사업위원회는 터널의 3개월간 폐쇄와 차내 내장재의 교체, 부외관계 기관과의 연휴, 직원의 교육 훈련 강화등을 지시했다. BART는 이 지시에 따라 좌석의 난연화, 열차화재시의 매뉴얼 정비, 직원의 훈련등에 주력하여 영업을 재개했다.
1987년 9월	근철동 대판선 생駒터널 (연장 약 4.7 km)	近鐵 生駒 터널(복선으로 東大阪측에서 하행 경사, 1986년 10월 개통)에서 東大阪측 갱구에서 약 2.0 km에 있는 맨홀에 설치되어 있는 송전케이블의 접속 박스이 발화되어 맨홀내, 입갱내(내경1m의 금속관으로 약 50 m 상부에 있는 구 터널내 전개폐소로 통하고 있다) 및 전개폐소내의 송전케이블이 연소했기 때문에 연기가 터널내에 가득 찼다. 터널내에 진입한 大阪港發 生駒行 보통전차(6량 편성, 승객 약 53명)가 터널내에 연기를 확인한 직후에 정전되어, 화재현장에서 약 700 m 떨어진 지점에서 정차했다. 승무원과 지령소는 전력복구등에 대해서 연락을 취했으나 연기상황 때문에 정차 약 30분 후에 운전지령 지시에 따라 승객을 피난시켰지만 승객 1명이 사망하고, 48명이 중경상을 당했다. 그리고 生駒측에서 터널로 진입했던 상행전차는 東大阪側 갱구로 탈출했다.
1996년 11월	영불 해협 터널	영불 해협 터널(Channel Tunnel)을 운행중인 트럭 수송용 화물열차(Heavy Goods Vehicle(HGV)Shuttle)에서 화재가 발생했다. 승무원, 승객은 전원 무사했지만 터널은 큰 손해를 입었다.

였는데 각각의 터널 화재에서는 발생 상황이 다방면에 걸쳐있다. 표 안에 있는 과거의 대규모적인 화재 사례 중 차량의 전기계통에서 발화되는 사례가 대부분이다. 일반적으로 터널은 폐쇄적인 공간으로 볼 수 있기 때문에 발화시에는 연기에 의하여 화점으로 쉽게 진입할 수 없어 피해가 계속 확

대되는 경향이 있다.

3. Backlayering과 임계유속(critical velocity)

터널에서 화재가 발생하면 그림 1과 같이 화재

에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 터널의 천장을 만나면 터널의 길이 방향으로 전파된다. 피난 방향으로 연기가 전파되지 못하도록 피난방향에서 화재 방향으로 기류를 불어주게 되는데 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 역기류라고 한다. 역기류가 형성되면 피난하던 사람들이 연기의 독성가스에 의하여 질식하게 되므로 인명피해가 발생하게 된다. 이러한 역기류가 발생하지 않도록 불어주는 최소한의 유속을 임계속도라고 하며, 화재하중, 터널의 단면, 터널구배에 의하여 결정된다.

임계속도는 아래 식에 의하여 계산할 수 있는데 화재 위치의 온도와 터널의 구배와 연계되어 있어 반복계산에 의하여 수립시켜야 한다. 임계속도식의 항목을 보면 동일한 화재하중에 대하여 터널의 높이가 클수록, 터널면적이 작을수록 큰 임계속도가 요구되며, 동일한 터널의 단면구조에 대하여 화재하중이 클수록 큰 임계속도가 요구됨을 알 수 있다. 지하철터널의 경우 터널의 높이가 유사하므로, 단선의 경우보다 복선의 경우가 단면적이 크므로 동일한 화재하중에 대하여 더 작은 임계속도가 요구됨을 예측할 수 있다.

· 임계속도

$$V_c = K_g \left[\frac{gHQ}{Fr_c \rho C_p A T_f} \right]^{1/3}$$

· 구배효과

$$K_g = 1 + 0.0374(\text{grade})^{0.8}$$

· 화재위치의 가스 평균온도

$$T_f = \frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T$$

- V_c : Critical velocity
- g : Acceleration of gravity
- H : The distance from the base of the fire source to the highest point in the ceiling
- Q : Convective fire heat release rate
- ρ : Density of approach air
- C_p : Specific heat of air
- A : Tunnel area
- grade : Absolute value of the tunnel downgrade
- T_f : Average temperature of fire site gases
- T : Temperature of the approach air
- Fr_c : The critical Froude Number

앞의 임계속도 관계식을 이용하여 단선터널과

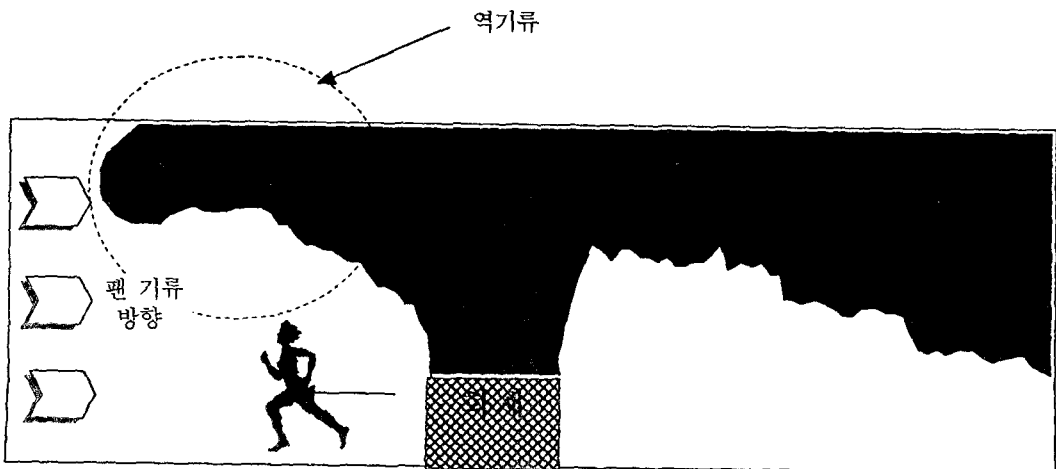


그림 1 터널에서의 화재와 역기류

복선터널에 대하여 입계속도와 화재지점의 연기의 평균온도를 계산한 예를 아래 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 적용해야 할 화재하중이 주어지면 이에 대한 입계유속이 결정되므로 입계유속이상의 제연유속을 생성할 수 있는 팬의 풍량을 선택하여야 하고, 평균온도 온도 이상을 견딜 수 있는 팬의 온도등급을 선택하여야 한다.

4. 제연시스템 성능평가 절차

터널과 환기방식이 주어지면 먼저 필요한 제연 용량에 대한 기초 자료를 만들기 위하여 입계유속에 대한 평가를 하여야 한다. 입계유속이 주어지면 이를 만족시키기 위한 개략적인 압력손실과 풍량을 고려한 팬의 성능을 결정한다. 다음으로 예상되는 상황에 대하여 어떤 팬을 어떻게 구동시킬

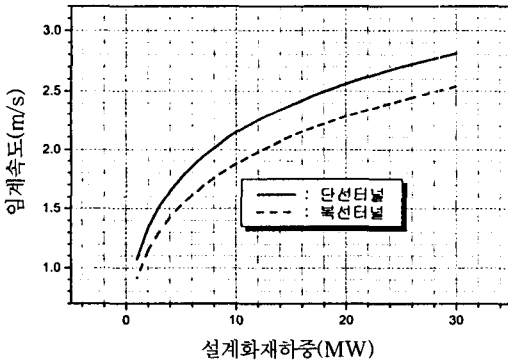


그림 2 단선터널과 복선터널에서의 화재하중과 입계속도의 관계

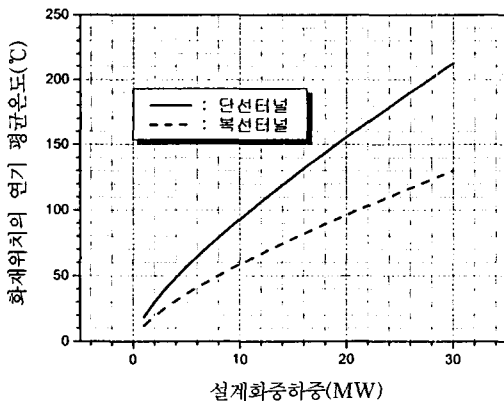


그림 3 단선터널과 복선터널에서의 화재하중에 따른 연기의 평균온도

것인가를 결정하는 구동모드를 선정한다. 성능곡선을 기반으로 하는 SES 프로그램을 수행하여 각 구간의 제연풍속을 계산하고 각 구간에서 입계유속과 비교한 후 모든 구간이 입계유속보다 크면 설계조건을 만족한다. 3차원 CFD 제연 시뮬레이션을 통하여 실제 연기가 제연되는지를 확인하면 제연성능평가 시뮬레이션은 종료된다. 이러한 절차에 대한 흐름도를 그림 4에 나타내었다.

4.1 SES(Subway environmental simulation)

SES 컴퓨터 프로그램은 복잡한 지하철도 시스템의 유동, 열전달 습도 및 공조 시스템의 해석을 위해 미 교통부의 Volpe National Transportation Systems Center의 지원하에 Parson Brinckerhoff에 의해 개발되었다. 그 동안 서울을 비롯한 세계 유수의 도시들에서 충분한 검증을 거쳐 오고 있는 프로그램이다. 주요 성능으로는 복잡하게 얽혀 있는 지하철도망과 다양하게 운행되는 지하철의 운전상태를 고려한 철도망내의 공기유동해석, 열역학적인 해석 및 습도의 예측 등을

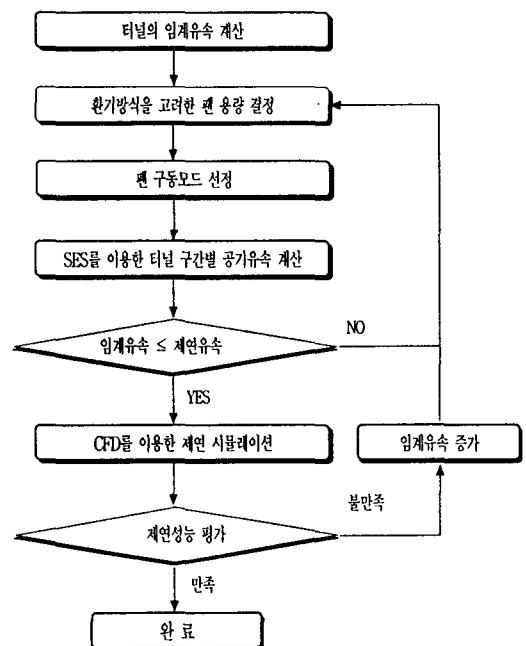


그림 4 제연 시뮬레이션 절차 흐름도

할 수 있도록 되었다. 최근에는 화재 발생시에 발생 될 수 있는 현상들을 해석할 수 있는 '화염모델'이 추가 되어 역기류 현상(back layering) 등을 예측 할 수 있도록 설계 되어져 있다. 이는 특히 뜻하지 않은 사고의 발생시 승객의 안전한 대피 시간이나 경로 등의 설계에 매우 중요한 영향을 미치고 있다. SES는 아래와 같이 크게 4가지의 모듈로서 구성되어 있으며, 서로 연결되어 전체적인 시스템을 해석한다.

- Train Performance subprogram
- Aerodynamic subprogram
- Humidity/Temperature Subprogram
- Heat Sink/Environmental Subprogram

SES 프로그램의 적용사례는 아래와 같이 유효성을 평가하기 위한 경우와 실제 설계목적에 활용하기 위한 경우로 크게 나눌 수 있다.

(1) 프로그램 평가 목적

Montreal, Pittsburgh, San Francisco, Toronto, Washington, The Memorial Tunnel.

(2) 현장 적용 목적

Atranta, Baltimore, Boston, Bucharest, Buenos Aries, Buffalo, Camden, Caracas, Chicago, London, Hong Kong West Rail, Toronto, Seoul 등 다수.

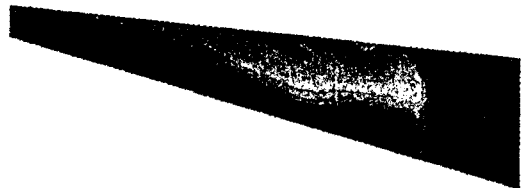
4.2 CFD(Computational fluid dynamics)

CFD를 이용한 시뮬레이션은 유체역학의 지배방정식을 컴퓨터로 계산하여 현상을 구현하는 것을 의미한다. 일반적으로 터널과 같이 대형 구조물의 경우는 실험대규모실험을 하기가 곤란하고, 특히 설계단계에서는 적용이 불가능하다. 그림 5와 그림 6은 복선터널의 경우에 대하여 CFD가 적용된 사례를 나타내고 있으며, 화재하중이 각각 5 MW와 15 MW인 경우에 대하여 제연유속 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s를 적용한 사례이다. 5 MW의 화재하중인 경우 제연유속이 1.5 m/s로 불어 줄 경우 연기가 차량방향으로 역류하는 역기류가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 15 MW인 경

우에는 2.0 m/s에서 역기류가 발생하였지만 2.5 m/s에서는 연기가 제어되므로 15 MW를 화재하



(a) 속도 1.5m/s 일 때 온도 contour



(b) 속도 2m/s 일 때 온도 contour



(c) 속도 2.5m/s 일 때 온도 contour

그림 5 화재하중이 5 MW일때의 제연유속에 따른 연기의 거동



(a) 속도 2.0m/s 일 때 온도 contour



(b) 속도 2.5m/s 일 때 온도 contour

그림 6 화재하중이 15 MW일때의 제연유속에 따른 연기의 거동

중으로 보는 경우 제연유속이 2.5 m/s가 되도록 팬의 사양과 구동모드를 선택하여야 한다.

5. 맺음말

터널에서 화재가 발생하였을 경우에 필요한 제연설비의 제연유속에 대하여 알아보았다. 터널에서도 일반건축물과 마찬가지로 화재 발생빈도는 상당히 낮으나 일단 발생하면 대형 인명사고가 될 가능성이 높으므로 적절한 제연설비를 갖추는 것이 필요하다. 국내에서는 터널의 제연설비에 대한 성능규정이 없으므로 세계적으로 활용되고 있는 임계유속 평가식을 소개하고, 계산 예를 제시하였으며, CFD를 활용하여 제연성능을 확인하였다. 터널의 제연유속에서 가장 중요한 것은 터널내에서 발생가능한 화재하중을 적절히 선택하는 것이 중요하며, 화재하중은 터널을 통과하는 차량의 특성에 의하여 결정된다. 그리고 임계유속은 화재하중과 터널의 기하학적 특성에 의하여 결정된다. 국내에서는 외국에서와 같은 대형 터널화재사고는 없었지만 선진국의 사고를 답습하지 않기 위하여 미리 대비하는 것이 중요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. A. E. Vardy, 1988, "A Safe Ventilation Procedure for Single-Track Tunnel, 6th, International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," Durham, UK. pp. 567~574.
2. W. D. Kennedy, J. G. Sanchez, 1991, "The Use of Inflatbale Barriers and Jet Fans for the Control of Smoke in the Washington Subway. 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," Brighton, UK. pp. 433 ~464.
3. Harriet Ashworth, David Ayling, 1994, "Fire Testing of Trains in Tunnels 8th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels," Liverpool, UK. pp. 245~252.
4. Andrew Marles, 1977, "Escape From Tunnel - A Fire Service View on Single Bore Tunnel Incidents ITC Conferences on the Escape from Trains," Heothrow, UK. pp. 1~11.
5. K. A. Yang, T. C. Yeh, 1997, "An Experimental Investigation on Smoke Management in Taipei Transit Systems, TIC Conferences on Mass Transit Management," K. L., Malaysia. pp. 101 ~ 110.
6. K. Pucher, 1998, "The Accuracy of CFD Modelling Techniques for Fire Prediction, Proceeding of 3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels," Nice, France. pp. 109~115.
7. D. Tetzner, R. Pollak, 1988, "Critical Velocity - Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation, Proceeding of 1st International Conference on Tunnel Fires and Escape From Tunnel", Lyon, France. pp. 109~115.
8. NFPA 130, 1997, "Standard for Fixed Guidway Transit Systems., Quincy : National Fire Protection Association.
9. Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc., 1997, Subway Environment Simulation(SES) Computer Program, Version 4, Prepared for the U.S. Departments of Transportation.
10. Hitoshi Kurioka, 1998. 10, "터널내 사고와 금후의 과제, 화염," Vol, 48. No. 5.
11. Shigeru Isohata, 1981. 3, 지하철 배연의 실측과 고찰, 공기조화, 위생공학, 55-3.
12. Masakau Sakurai, 1981. 3, 지하철 방재의 설계법, 공기조화, 위생공학, 55-3.
13. (주)대양설비기술단, 1999, "장대터널의 화재 시뮬레이션 및 피난기술개발에 관한 연구보고서", pp. 81 ~90.