

# 대심도 지하차도의 방재계획 - 화재대책을 중심으로



**김 효 규**  
 (주)지엔비ENG 대표이사  
 hgkim@gnbeng.com



**윤 성 옥**  
 (주)GS건설 기술연구소 책임연구원  
 yoonsw@gscnst.co.kr

## 1. 머리말

최근 서울시 U-Smartway, 수도권 광역급행철도(GTX) 프로젝트 등이 언론에 보도되면서, 대심도 지하공간의 개발에 대한 많은 장점들이 언급되고 있다. 특히, 도심지 지상공간의 효율화, 쾌적화를 위해서는 지하공간의

개발이 필요한데, 이를 위해서는 환경적 측면에서의 환기(Ventilation) 문제와 비상시 방재문제에 대한 대책수립이 주요한 이슈가 되고 있다. 본 논고에서는 대심도 지하차도의 건설계획과 관련된 방재계획 중 화재대책을 중심으로 살펴보고 한다.

[표-1] 상부 지상공간의 친환경적 활용방안

대중교통수단 확충	차로폭 조정	보행자 및 자전거 전용도로 설치
보도 확장	자연녹지 조성	생태공원 조성

## 2. 방재계획 - 화재대책을 중심으로

일반적으로 방재라 함은 재해와 재난으로부터 국토를 보전하고 국민의 생명과 재산을 지키는 것을 지칭하는 말이다. 특히 재해는 태풍, 홍수, 호우, 폭설, 가뭄, 해일, 지진 등 자연적 재해와 화재, 붕괴, 교통사고, 화생방 사고 등과 같은 인위적 재난으로 구분할 수 있다.(박경부, 2003) 그러나 본 논고에서는 지하차도 건설과 관련하여 차량(Vehicle)을 원인으로 한 관련 사고대책 즉, 교통사고 및 차량화재와 같은 사고를 중심으로 한 방재대책을 살펴 보고자 한다.

### 2.1 화재특성

일반적인 도로터널 내 화재는 주로 고온의 열 및 복사열, 저산소 농도, 가시도 악화 및 여러유형의 유독성 가스들을 발생하고 있으며, 인명 및 구조물 등에 치명적인 손상을 초래할 수 있다. 따라서 화재 시 적절한 환기설비의 가동이 중요하네, 일반적인 화연 제어의 목적은 첫째, 터널 이용자가 최대한 대피할 수 있도록 함으로서 인명을 구하고, 둘째, 인명의 구조와 함께 화재진압이 가능하도록 하고, 셋째, 차량을 포함한 기타 시설물의 폭발을 방지하며, 넷째, 구조물과 터널 내 설비의 손상을 최소화하는 것으로 정의할 수 있다. 이러한 방재계획을 수립하기 위해서 우선 고려해야 할 사항으로는 ① 복사(Radiation), ② 온도(Temperature), 대류열(Convected heat), ③ 가시도(Visibility), ④ 독성(Toxicity), ⑤ 대피시간(Escape time) 등이 있다.

먼저 대심도 지하차도의 특성은 소형차량 중심의 교통패턴을 보이고 있으며, 차도 내 내공단면적이 협소하고, 터널 내 분기 및 합류구간이 다수 있으며, 대심도에 따른 대피동선의 길이가 긴 특징을 보이고 있다. 일반적인 도로터널의 설계화재강도는 20~30MW 급으로 규정하고 있으나, 지하차도의 설계화재강도를 규정하고 있는 나라는 그리 많지 않은 실정이다. 다만, 프랑스의 경우는 A86 터

(표-2) 국내외 설계화재강도(HRR)의 비교

구분	승용차	승합차	버스	트럭	탱크롤리
국토해양부 (2009)	화재강도(MW) 5 이하	-	20	30	100
	연기발생량(m³/s) 20	-	60~80	80	200
소형차전용 지하차도 (2010년 발간예정)	차량은 승합차(소형트럭) 기준을 기증하며, 화재강도는 15MW(적재화물고려시 +5MW 추가), 연기발생량은 60CMS 적용하고 있음.				
WRA (1999)	화재강도(MW) 2.5~8	15	20	20~30	100
	연기발생량(m³/s) 20~30	50	50~80	-	100~300
NFPA (2008)	화재강도(MW) 5~10	10~20 (다중승용)	20~30	70~200	200~300
프랑스 Inter-Ministry Circular No. 2000-63(2000)	Type of tunnel	Characteristic vehicel(s)	Fire size(MW)	Smoke Generation rate(m³/s)	Minimum airflow velocity(m³/s)
	Headroom(2m)	2or3 light vehicles	8	-	2
	2m(Headroom)3.5m	1 van	15	50	2.5
	Headroom)3.5m				
	With/ut Dangerous Goods	Heavy truck	30	80	3
With Dangerous Goods	Hydrocarbon tanker	200	1300	4	

널 건설과정에서 소형차 전용 터널의 대하여, 시설한계(Headroom) 높이를 기준으로 화재규모를 달리 적용할 수 있도록 방재기준을 규정하고 있다.

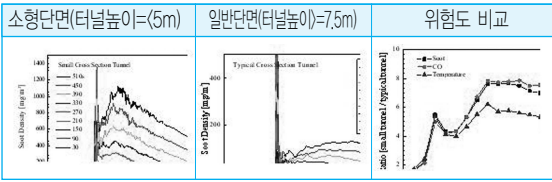
따라서 터널규모(내공단면적 등)별로 화재 시 온도 및 독성가스의 전파특성이 다르므로 이를 고려한 방재계획의 수립이 필요하다.

실제 유지오 등의 연구보고에 따르면, 소형단면을 적용한 터널의 경우, 일반터널에 비해 유해가스 농도는 약 7배, 온도는 약 5배 정도가 더 위험한 것으로 분석하고, 단면적 축소에 따른 터널높이의 감소는 연기의 하강으로 온도 및 유해가스 농도가 높아져 대피환경이 더욱 열악하다고 보고하고 있다.

또한 최순옥 등의 연구에 따르면, 환기방식과 화재규모에 따른 지하구조물 벽면에서의 온도분포도 소형터널에서 더욱 높게 나타난다고 보고하고 있다.

따라서 아직 국내에 설계기준으로 정립되어 있지는 않지만, 대심도 지하차도의 방재계획과 관련하여 터널특성을 고려한 설계화재강도를 선정할 필요성이 제기되고 있다.

(표-3) 단면형식에 따른 터널내 온도 및 독성가스 위험도 비교



(표-4) 화재시나리오에 따른 지하구조물 벽체의 최대온도 분포(열원에서 10m 부근)

화재성장곡선(HRR)	터널(구조물) 형식					
	기계환기시		자연환기시			
	20MW	30MW	50MW	20MW	30MW	50MW
	NATM 터널	슬드 TBM 터널	BOX 구조물	지하철복선터널		
	435°C	759°C	1321°C	761°C	1162°C	1468°C
	749°C	1229°C	1904°C	1315°C	1826°C	2252°C
	818°C	1336°C	1649°C	1151°C	1559°C	1839°C
	559°C	1036°C	1357°C	799°C	1250°C	1943°C

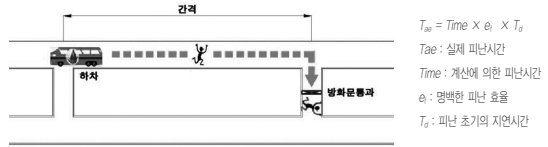
## 2.2 대피특성

지하차도 건설과 관련된 또 하나의 이슈는 대피특성이 어떻게 반영하느냐와 관련이 있으며, 실제 화재 시 인명피해를 최소화할 수 있도록 신속한 피난방재대책을 수립하는 것이다.

대피시간과 관련하여서, 연기가 없는 상황의 빌딩이나 지하역사 내에서의 보행속도는 대략 1.0~2.0m/s 정도로 보고되고 있다. 그러나 터널에서의 탈출속도에 대한 구체적인 자료는 거의 없는 상태이며, 다만 여러 시설물들 사이에서의 연기에 의한 가시도, 조명, 탈출구 표시판 등에 따라 대략 0.5~1.5m/s 정도로 추정하고 있다. 대피자가 화재로부터 안전한 대피장소로 탈출하려면 대피하기 전에 화재를 감지하고 경보하는 시간, 반응하여 차량에서 탈출하는 시간, 안전한 장소로 걸어가는 시간 등이 고려되어야 한다. 감지(detecting) 및 경보(alerting)의 총시간은 화재감지의 형태와 어떻게 차량내 이용자들에게 화재정보를 제공하느냐에 달려있다. 대략적으로 잘 관리되는 터널의 경우는 2~5분 정도 소요되는 것으로 보이며, 비관리 터널은 그 이상의 시간이 소요될 것으로 추측된다. 또한 반응하여 차량을 탈출하는데 소요되는 시간을 추정하기

가 상당히 어렵지만, 승용차보다 버스 내의 대피자가 더 오래 소요될 것으로 보여지며, 대략 그 시간은 0.5~5분 정도로 보고되고 있다.

또한 실제 피난 시간산출에 대해서는 여러 가지 상황을 고려할 수 있지만, 명백한 것은 계산된 시간외에 안전율을 고려한 시간이 피난방재계획 내 포함되어 있어야 한다는 것이다. 실제 성능위주의 소방공학(Performance based fire safety design)에서 중요시하는 대목이기도 하다. 다음은 실제 피난시간을 계산하는 모델을 나타내고 있다.



(그림 1) 실제 피난시간의 개요



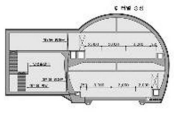

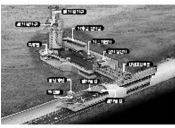

지하차도 건설과 관련하여 본선터널을 통한 대피거리 산출시, 국내 도로터널 내 피난연결통로의 간격은 250m 기준을 기준하고 있다. 이는 화재 시 터널 내 선단의 연기전파 위치(CO 농도 100ppm 기준)와 최종 대피자의 위치를 비교하여 피난 가능한 대피거리를 산출하고 있는 것이다. 이러한 분석법은 흡입연기의 농도와 노출시간에 따른 연기의 총 복용량에 대한 개념이 없는 것으로 실제 대피가능성의 분석법과는 다소 거리가 있다고 할 수 있다.

아무튼 국내 도로터널의 피난특성을 고려할 경우, 계획될 수 있는 피난대피시설의 형태를 정리해 보면 다음과 같다.

대체적으로 본선터널의 경우는 각각의 병설터널을 연결하는 피난연결통로가 계획될 수 있으며, 복층터널일 경우는 피난계단형식이나 측벽형식의 피난대피통로가 계획될 수 있다. 그리고 복층터널의 하부공간이 있을 경우는



(그림 2) 일반적인 도로터널의 피난대피시설

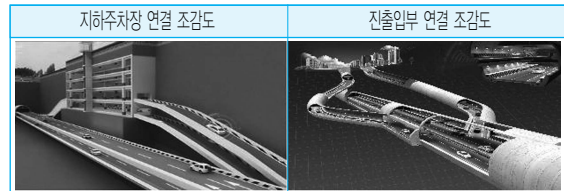
(그림 3) 대심도 지하차도 건설시 예상되는 피난대피시설의 형태(예)

하부박스 공간을 통한 피난대피통로가 계획될 수 있을 것이다. 반면, 대심도 지하차도의 경우는 본선 내 진출입부(IC 구간, UD 구간 등)가 계획될 수 있으므로 이런 경우에는 연직갱 혹은 경사갱 형식의 피난대피통로(터널)가 계획될 수 있다. 참고적으로 병설터널일 경우는 서비스터널을 통한 피난대피터널이 계획될 수도 있을 것이다.

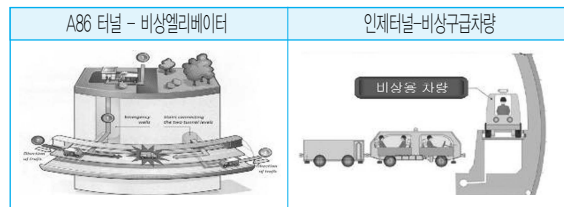
특히, 대심도 지하차도의 특성상 진출입부는 경사가 크고, 외부 도로와의 연결로 형성이 쉽지 않기 때문에, 진출입부의 연장이 1~3km 정도로 길 수 있다는 점이다. 이럴 경우 계획될 수 있는 피난대피시설은 연직갱이나 경사갱을 통한 특별대피로(외부탈출구)의 건설이나, 측벽 혹은 하부공간의 대피통로 건설 등을 고려할 수 있다. 이와 같은 피난대피시설의 계획과 관련하여 고려될 사항중 하나는 대피통로를 통한 대피시 대피인원의 자력에 의한 대피 가능한 한계연장을 얼마로 볼 것인가 하는 문제이다. 물론 연직갱 형태일 경우는 A86 터널처럼, 비상용 엘리베이터를 설치하여 이곳을 통해 대피하거나, 인제터널처럼 특수 제작된 구급차량이 있는 경우는 부상자 일부를 구인할

수 있겠지만, 대부분의 대피인원을 어떻게 대피시킬 수 있는가 하는 문제이다.

이와 관련하여 터널 내 피난특성을 참고할 수 있는 문헌으로 NFPA-130 코드를 살펴볼 수 있는데, 물론 지하철을 기준하고 있지만 여기에는 CO 노출 시간을 고려한 대피시간을 대략적으로 기술하고 있다. 즉, CO 농도가 노출된 상황에서의 대피거리를 3000ft(984m)로 한다면, 대피속도를 1.09m/s 인 경우, 대략 15분 이내에 대피를 완료하여야 한다. 또한 대피시간 30분동안 연기발생시 함께 생성된 CO 농도가 800ppm을 초과하지 않도록 한 규정을 역산한다면, 연기노출이 없는 상황에서 대피가능한 한계거리를 대략 2,000m 정도가 볼 수 있다. 따라서 연기노출이 없다고 무한정의 대피거리를 대피할 수 있다는 것은 다소 무리가 있으므로, 대피거리가 2,000m 를 초과할 경우는 외부탈출구를 계획하는 것이 바람직하는 것으로 분석된다. 물론 정확한 대피가능거리 분석을 위해서 FED 분석법 혹은 ASET/RSET에 의한 분석법을 통한 대피가능거리를 산출하는 것이 바람직할 것이다.



(그림 4) 본선터널에서 각종 진입출입부 연결 조감도



(그림 5) 화재시 소방대 출동 및 구급차량 시스템 개요도

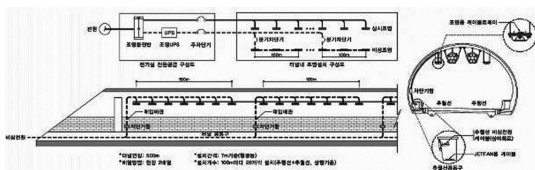
### 2.3 전원공급 특성

현행 설계 시 비상전원을 공급하는 부하는 비상조명(기본조명의 1/3), 소화전관련 부하, CCTV 및 통신부하, 제연팬 부하 등으로 구분할 수 있으며 이는 한전전원을 통해 공급하는 것이 기본구성이다. 이러한 비상전원은 화재나

한전의 사고 혹은 정전 시 비상발전기를 가동하여 비상부하에 전원을 공급하도록 되어있다. 그러나 터널 방재계획과 관련하여 화재시 전원공급에 대한 다음과 같은 문제점들이 제시될 수 있다.

① 화재 시 비상전원을 공급하는 케이블 손상으로 인해서 비상전원을 공급하지 못하는 경우, 화재원 직상부의 온도는 약 700~1,000℃ 내외의 고온이므로 케이블이 연소되어 비상전원의 공급이 불가능하게 된다. 이때는 케이블의 손실 이외에 단락전류에 의한 차단기의 트립(Trip)이 되며 크게 Panel의 손실도 가져올 수 있다. 따라서 터널 천장부에 설치된 조명(비상조명)의 경우와 제연용 제트팬 등의 비상전원 공급의 문제가 야기될 우려가 있다. 이에 따른 문제를 해결하기 위해서 소방법에는 제연용 제트팬의 경우는 난연성 케이블인 FR-8 케이블을 사용토록 규정되어 있으나 이 경우도 장시간(약 20분이상)의 화재가 지속될 때에는 케이블의 안전을 보장받을 수 없다. 따라서 화재규모에 따라 차이가 있겠지만 대규모 화재에도 안전한 방법을 강구할 필요가 있다.

따라서 다음은 터널 공동구를 이용한 비상조명등을 준별로 전원공급을 할 수 있도록 구성한 예를 나타내고 있다. 즉, 무정전 전원설비에 의해서 점등되는 비상조명등의 주 전원공급선로는 공동구 및 벽체매입 배관방식으로 시설하고 피난연결통로의 설치간격을 2개의 구역으로 나누어 구역별로 분기차단기를 설치하여, 화재 등 사고로 인해 천정부 전원공급선이 단락, 지락되는 경우에 해당구역의 차단기만 차단되어 사고구역 이외의 선로는 정상적으로 전원이 공급될 수 있도록한 전원공급선로의 구성을 제시하고 있다.



〈그림 6〉 비상조명등 준별 설치 개념도

② ①의 경우는 물론 제트팬 환기방식의 경우를 언급하였지만 실제 '제트팬+수직갱' 등의 방식을 채택한 경우도 값비싼 시설에도 불구하고 화재시 수직갱을 이용한 연기 및 유독가스의 배출을 할 수 없는 경우가 국내의 현실이다. 이는 화재시 제연설비 자체를 제트팬으로만 계획하고 있으며 수직갱의 축류팬은 환기용으로만 계획을 하고 있기 때문이다. 따라서 설계시 수직갱의 축류팬은 화재시에 정전이 되면 비상발전기에 의한 운전이 불가능할 뿐만 아니라 실제 아무 도움이 되지 않는다. 다음의 표는 실제 국내에서 설계된 도로터널의 비상시 전기용량에 관한 사례를 정리한 것이다. 물론 축류팬의 경우 전기적 용량이 커서 비상시 발전기로 운전을 하기 위해서는 경제적인 측면을 고려하지 않을 수 없다.

〔표-5〕 축류팬 설치터널의 비상발전기 용량

터널명	환기방식	축류팬 용량	비상시 용량	정상시 용량	축류팬의 용도
A 터널	집진기	110 kW	1,000 kW	2,750 kW	환기용
B 터널	집중배기	940 kW	1,000 kW	3,500 kW	환기용
C 터널	집진기	400 kW	600 kW	1,550 kW	환기용
D 터널	수직갱	680 kW	1,500 kW	2,750 kW	환기용

③ 횡류식과 반횡류식의 경우도 화재 시 비상전원의 공급이 안정적으로 이루어지지 않는다면 무용지물이 될 수밖에 없으며 화재 시 더욱더 큰 위험에 노출될 것이므로 반드시 비상용전원으로 공급되어야 한다. 이 경우도 비상용 발전기의 용량이 상당히 커져야 하므로 경제적인 문제로 대두될 수 있다.

간략하게 비상전원의 공급과 관련된 몇 가지 문제점을 언급하였지만 비상전원의 안정된 공급은 실제 간과하고 넘어가서는 안되는 중요한 문제이므로 인명피해를 최소화하기 위해서는 어느 정도의 경제적인 면을 감수할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 2.4 기타 방재기준상의 특성

국내외적으로 지하차도의 방재기준에 대한 구체적인 기준서가 제시된 것이 없으므로, 여기서는 전반적인 도로

터널과 관련된 주요 방재기준상의 특징을 개괄해 보고자 한다.

(1) WRA(구, PIARC)의 권장사항

터널 방재계획시 고려될 사항으로 PIARC에서는 아래와 같은 사항들의 고려를 권장하고 있다.

- ① 대피시간: 탈출시간은 수 분 정도가 소요되며 정상 보행속도는 약 1.5m/s 정도이나 화재연이 존재할 때는 0.5~1.0m/s 정도로 낮아지는 경향이 있다.
- ② 허용복사열: 신체의 피부노출 한계치는 2~2.5kW/m<sup>2</sup> 정도이며, 소방관은 5kW/m<sup>2</sup> 정도까지 허용가능하지만 그 작업시간은 30분을 초과하지 말아야 한다.
- ③ 허용온도: 피난자가 15분간 견딜 수 있는 온도는 80℃ 이하로 유지되어야 한다.
- ④ 최소 가시도: 연기가 있는 상황에서 대피할 수 있는 가시거리의 최소 7m 이상이며, 표시판을 인식하기 위해서는 15m 정도이므로 최소 가시거리는 7~15m 이상 확보되어야 한다.
- ⑤ 독성가스: 차량화재에 대한 구체적인 자료가 없으므로, 최소가시거리의 확보는 독성가스의 한계로 대신할 수 있다.
- ⑥ 콘크리트 붕괴: 콘크리트는 표면온도가 200~250℃에서 균열이 시작되며, 그 붕괴는 수 분 동안에 걸쳐서 진행되므로 피난자에게는 별 문제가 되지 않을 수 있지만 소방관에게는 위험할 수 있다.
- ⑦ 설비물의 손상: 중요한 설비는 400~450℃ 정도에서 손상되지 말아야 한다.
- ⑧ 설비물의 화재저항: 충분한 수의 제연팬과 기타 화재진압 장비들은 탈출 및 화재진압 동안에 대하여 충분한 내화능력을 지녀야 한다.

(2) UN/ECE의 권장사항

최근 유럽에서는 Mont Blanc(99.3, 프랑스/이탈리아), Tauern(99.5, 오스트리아), St. Gotthard(01.10, 스위스)

터널 등의 대형 화재사고 이후 터널안전에 관한 많은 관심과 대책을 강구하고 있다. 이중 UN/ECE(United Nations Economic Commission for Europe)산하 내륙수송위원회(Inland Transport Committee)내 전문가 그룹인, Ad Hoc Multidisciplinary Group은 다양한 형태와 연장의 도로터널에서 안전과 관련된 최소한의 요구사항에 대한 권장사항의 개발을 목적으로 창립되었으며 2001년 12월에 최종안이 제출되었다. 보고서에 따르면 도로터널 이용자들의 그릇된 행동이 대부분 터널사고의 주요원인이라고 분명히 지적하면서, 사고확률은 대면통행의 도로보다는 고속도로가 매우 낮고, 터널 내에서의 사고빈도건수는 긴 직선형 일반 도로보다 낮지만 그럼에도 불구하고 주변 환경의 제한 때문에 터널 화재사고는 매우 심각한 결과를 초래할 수 있다고 지적하고 있다. 따라서 도로터널의 최적 안전수준을 달성하기 위해서는 1차 목표를 예방에 두면서 2차 목표로 화재사고의 주요 요인을 감소시키는 것을 제안하고 있으며, 도로터널의 안전에 영향을 주는 요소로 크게 ①Road users, ②Operation, ③Infrastructure, ④Vehicles로 구분하여 각각의 세부적인 권장사항을 제시하고 있다.

방재계획과 관련하여 보고서는 PIARC의 권장사항을 대부분 수용하고 있으며, 여기서는 PIARC의 권장사항과 상이하거나 언급되지 않은 내용을 중심으로 살펴본다

먼저 '환기/방재/대피' 내용들을 중심으로 개괄해 보면 다음과 같다.

- ① 터널화재 설계시 화재규모는 30MW로 가연성 화물이 없는 중차량을 화재원으로 하며, 플래쉬오버(Flashover)에 도달하는 시간은 10분, 화재연(smoke)의 생성량은 80CMS 그리고 지속시간은 60분 이상으로 한다.
- ② 기계환기 시스템이 없는 자연환기 터널에는 화재시 안전을 위하여 이동용 고성능 팬(이동환기 시스템)의 사용을 고려할 수 있다.
- ③ (급기)반형류식 환기시스템 터널의 경우, 화재시 덕

트공간내 기류를 급기에서 배기로 역류하기 위해서는 상당한 시간이 필요하므로 같은 덕트공간을 통해서 급기와 배기가 이루어지는 시스템의 사용은 곤란하며, 신선공기의 공급과 화재연의 배연을 위해서 덕트는 분리되어야 한다.

④ 양방향 터널내 종류식 환기시스템을 적용하기 위해서는 위험도분석을 통한 안전성이 제시되어야 하는데, 그러한 위험도분석에는 전반적인 설계요소 및 주변조건들을 고려되어야 하며, 최소한 교통량, 통행방식 그리고 터널제원은 포함되어야 한다.

⑤ 터널의 종단경사는 가능한 5% 미만으로 하고, 쌍굴 터널의 피난연결통로는 200~500m 간격, 차량용은 600~1500m 이내로 할 것

⑥ 자동화재진압시스템 및 고정식화재진압 장비(예, sprinkler)는 현 단계에서는 보류

다음으로 토목 기반시설을 중심으로 대피계획을 살펴 보면 다음과 같다.

화재 시나리오와 관련하여서는 실제 터널 화재시 발생하는 화재의 확산, 연기의 전파 그리고 기타 변수들을 고려하여야 하며, 만약 현재의 터널내 안전상태가 운전자들의 안전확신에 불충분하다면 부가적인 대책이 있어야 한다고 지적하고 있는데, 그러한 대책으로 200~500m 마다 있는 비상탈출구내 수직 탈출 갤러리(short perpendicular escape gallery)를 설치하거나, (Mont Blanc 터널과 같은) 도로 아래로 탈출갤러리를 설치할 것을 제안하고 있다. 특히 보고서는 바깥외부로 향한 통로가 없는 즉 출구가 없는 폐쇄된 셸터(shelter)는 만들지 말아야 한다고 언급하고 있는데 터널 형태별로 대피로의 형성은 다음의 기준을 따른다.

① 단굴 터널(single-tube tunnels) : 탈출로 건설에 대한 경제적, 기술적인 어려움을 고려하되 가능한 화재 시나리오 분석을 통해서 탈출로가 없을 때조차 운전자들의 안전이 보장된다면 터널 갱도 자체가 탈출로로서 사용될 수 있지만, 만약 이것이 입증되지

못한다면 비상 탈출로는 건설되어야 한다.

② 쌍굴 터널(twin-tube tunnels) : 비상구(emergency exit)의 설계로서 피난연결통로(cross passageways)의 이용을 권장하고 있으며, 한쪽 터널에서 사고발생시 반대편 터널은 탈출 및 (인명)구출통로(rescue route)로 사용되어야 한다. 이때 화재연의 전파를 차단할 수 있는 적절한 대책(공기차단이나 방화문)이 있어야 한다.

다음으로 운전자들의 대피요령에 관해 요약해 보면 다음과 같다.

① 터널내 운전자들에게 화재정보의 전파를 돕기 위해서는 국제적이고 종합적인 정보시스템(harmonized information system)(싸이렌, 플래쉬 조명 등)이 개발되어야 하며, ② 화재시 운전자들이 지체 없이 그들의 차량을 버려야 하며, ③ 즉각적으로 가장 가까운 터널내 비상구로 대피해야 한다는 정보를 운전자들에게 제공하기를 권장하고 있다.

이러한 이유는 대부분의 터널화재사고 사례들에서 명확히 나타나는 데, 화재지점으로부터 다소 멀리 떨어져 있는 운전자의 경우 화재에 노출된 위험정도를 잘 인지하지 못하기 때문이다. 따라서 라디오 재방송설비는 전달 메시지를 통해서 차량내 운전자들에게 그들의 생명이 위험함을 알리고 즉시 차량을 버리고 떠나야 하며, 또한 가장 가깝고도 분명한 탈출방향을 전달해야 한다.

(3) NFPA 502 코드 (NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways)

2001년 코드에는 문서에 대해 중요한 편집상의 재작성 및 재편성을 포함하고 있으며, 비상통신, 비상출구, 터널내 조명 그리고 터널환기의 관점에서의 기술적 변화가 이번 버전에 편입되어 있다. 더 큰 변화는 터널연장에 기초하여 이번 기준의 적용을 분명하게 하고 있다는 점이다. 예를 들어, 이번 기준은 연장이 90m 보다 짧은 터널을 제

외하고 있으며, 터널이 90m 이상일 때는 연결송수관(fire standpipe) 및 교통통제 시스템의 설치를 권장하고 있다. 터널연장이 240m 이상이고 터널내 어떤 지점으로부터 안전지역까지 최대거리가 120m를 초과하는 장소일 때 이번 기준의 모든 설비들이 적용되며, 마지막으로 터널연장이 300m 이상일 때 안전지역의 위치에 관계없이 이번 기준의 모든 설비들이 적용된다는 점이다.

NFPA 502에는 터널연장에 기초한 교통제어를 위한 요구사항도 나타나있는데, 90m를 초과하는 터널에는 화재경보 작동시 접근하는 차량의 진입을 막는 수단이 설치되어야 하며, 240m를 초과하는 터널에는 화재경보 작동시 접근하는 차량의 진입을 막고, 화재지점 하류의 교통을 소개하는 수단이 설치되어야 한다는 것이다.

또한 설계, 시공 및 탈출구(emergency exits) 및 피난 연결통로의 위치에 대한 상세한 요구사항을 제공하는데 주요내용은 다음과 같다.

- ① 먼저 탈출구는 터널 전체를 통해서 탈출구까지 300m를 초과하지 않는 주행거리를 고려하여야 하며, 탈출구는 최소 2시간의 내화구조로 구축되어야 한다
- ② 탈출구로 향하는 문은 피난방향으로, 피난연결통로의 문은 양방향으로 열리도록 되어야 하며, 최소 1시간의 내화성능을 가진 방화문이어야 한다. 또한 방화문을 여는데 필요한 힘은 가능한 낮아야 하며 222N을 넘지 말아야 한다. 더불어 차량통행으로 인해 야기되는 정압 또는 부압에 견디어 열리지 않도록 설계되어야 한다.
- ③ 터널이 최소 2시간의 내화구조에 의한 나누어진 곳이나 혹은 쌍굴 터널인 곳은 양 터널사이에, 탈출구 대신 사용할 수 있는 피난연결통로를 설치하여야 한다. 피난연결통로 간격은 200m 이내로 하며 개구부는 최소 1시간 내화성능의 자폐식 방화문을 설치하여야 한다. 더불어 최소 1m의 폭을 가지는 탈출구 통로는 피난연결통로의 양 측면에서 있어야 하고,

연석, 바닥 레벨의 차이, 장벽 등에 의해 차량진입으로부터 보호되어야 한다. 또한 중요한 것은 통로는 터널 전 연장을 통해 외부와 연결되어야 하며, 터널 내 상향 통로의 경우는 난간(guard rails)이 있어야 한다. 참고적으로 모든 탈출구나 피난연결통로에 분명하고 명확한 표시판이 있어야 하며, 걸어 다니는 지면은 미끄럼방지가 되어야 한다는 것이다.

그리고 기전설비와 관련된 내용들을 중심으로 정리해보면 다음과 같다.

- ① 화재시의 환기 및 제연과 관련한 내용으로서는 터널 연장이 240m를 초과하는 터널이라도 공학적 분석 결과 피난성능에 지장이 없는 경우는 터널환기설비를 (강제적으로) 요구하여서는 안 된다는 점을 밝히고 있다.
- ② 제연과 관련하여 양방향 터널의 환기는 연기층의 성층화를 교란하지 말고, 종방향 유속을 낮추어야 하며, 천장상부의 덕트를 통한 배기가 효과적이라고 기술하고 있다.
- ③ 팬과 관련하여서는 화재 시 열기류에 노출된 팬과 그 부품들은 250℃ 열기류 속에서 최소 1시간의 가동유지 및 화재에 직접 노출될 경우를 대비해 여분의 팬이 필요하며 팬의 급배기구는 재순환이 일어나지 않도록 조치하여야 한다.
- ④ 제어 순서상 현장제어 모드가 원격제어 모드에 우선하여야 한다.
- ⑤ 비상전원은 사고나 화재로부터의 영향을 최소화하도록 예비전원을 연결하여야 하며, 조명은 0.5초 이상 차단되지 않도록 하고 터널 내 조도는 3룩스 이상으로 한다.
- ⑥ 운전자는 화재 시 60℃ 이상의 온도에 노출되지 말아야 하며, 임계속도가 11m/s 이상이면 보행에 지장을 받는다.

참고적으로 ④와 ⑤에 관련하여, 홍지문 터널 화재사고에서 지적된 제어모드 및 비상전원에 대한 대비책이 보다

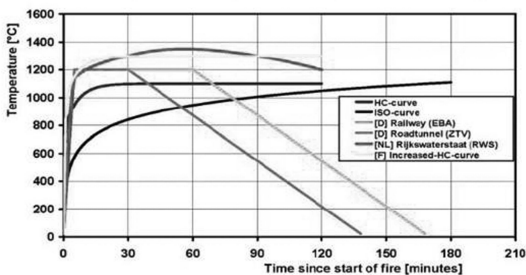


명확히 정립되어야 할 것으로 보인다. 왜냐하면 (반)횡류식 환기방식의 터널인 경우 별도의 제연팬이 없는 상태이며, 비상시 예비전원도 별도로 축류팬에 연결되지 않고 있다. 따라서 UPS(무정전 전원 공급 장치)에 의한 전원이 안정적으로 공급되더라도 화재에 의한 주전원 케이블이 파괴될 경우는 어떠한 제연대책도 없는 상태이므로 터널내 피난자들에게 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 제연상 가장 우수하다는 (반)횡류식 환기방식도 안정적인 전원의 공급이 없는 제트팬 환기방식의 터널보다 못한 결과를 초래할 가능성이 있다는 점을 분명히 고려하여야 할 것이다.

#### (4) 내화기준

국제적으로 내화성능에 관한 많은 권고사항들이 도출되고 있다. 대표적인 권고사항으로 WRA(세계도로협회)와 ITA(국제터널협회)의 공동연구결과를 들 수 있다.

각 유럽 국가들에서는 터널 증축부와 추가 방화벽(Thermal barrier)을 화재로부터 방호하는 차원에서 다음의 '온도-시간 곡선(Temperature-Time Curve)'을 사용하고 있는데, 주요특징은 다음과 같다.



〈그림 7〉 온도곡선(HC, ISO, EBA, ZTV, RWS, HCinc) 비교(Haack, Estefania, 1999)

- RWS(Rijkswaterstaat)곡선은 네덜란드 터널의 운영을 맡고 있는 Rijkswaterstaat의 기준이다. 네덜란드에서 이 곡선은 위험물 수송차량의 통과가 허용된 터널에 적용한다. 이 곡선은 독일의 ZIV(Zustliche Technische Vorschriften; 추가기술규정) 곡선에 비해 터널 구조물에 더 높은 화재온도와 지속시간을 적용하도록 고안되었다. 스웨덴은 수중터널

(submerged tunnels)이나 상부 증축용 커버가 작은 터널을 통과해도 좋다는 승인을 얻고자 할 때, 터널 피복부의 화재방지 정도를 측정하기 위해 RWS 곡선을 사용한다.(약 1,300°C) 참고적으로 네덜란드는 국토 전체가 해수면보다 아래에 있다. 따라서 터널은 해수면 아래에 놓이게 되므로 터널 구조물의 작은 훼손에도 큰 피해를 입을 수 있는 지리적인 약점을 가지고 있다.

- HC(Hydrocarbon; 탄화수소)곡선은 석유화학 공장의 위험물 저장지역이나 분배 지역 및 주유소의 화재 시 적절한 구조적인 내화성능의 필요에 의해 1970년대에 만들어졌다. 스웨덴에서는 RWS곡선이 적용되지 않는 터널의 화재 방호를 위한 안전율을 결정하기 위해 최대온도 1,100°C까지의 HC 곡선을 사용한다. 이 곡선의 그래프는 위험물 화재 경우에도 사용되는데, 위험물의 종류는 화재지속시간에 따라 최소 60~180분을 선정하고 있다. 프랑스에서는 터널 피복부의 화재 방호를 위한 안전율을 결정하는데 위험물과 무관하게 단기간에 급속도로 번지는 화재 시나리오를 기초로 할 때 HC 곡선을 사용하고 있다.
- HC 상승곡선(Increase HC or HCinc)은 프랑스에서 터널 피복부의 화재로부터 방호를 위해 설계 화재시 위험물의 연소속도를 고려한다. 즉 위험물로 인해 짧은 시간에 대형화재가 발생할 수 있는 터널의 경우에 최대온도 1,300°C의 HCinc 곡선을 사용한다. 특별한 화재의 경우는 최대 온도부하의 시간은 달라지는데, 즉 상부가 증축된 터널은 1,300°C에서 90분, 수중터널은 1,300°C에서 120분과 같이 다르게 적용하고 있다.
- 독일의 경우, ZIV 곡선과 EBA 곡선은 RABT(Richtlinien fuer die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunnel; 도로터널의 장비와 운영에 관한 규정)에서 규정하는 터널의 증축부와 추가 방화벽(Siding)을 화재예방기술적 차원에서 시험기준으로 측정할 때, ZTV에 명시된 온

도 곡선을 사용한다. ZTV 온도곡선은 일반 규정이기 때문에, 위험물과 비위험물 화재를 구분하지 않고 모두 적용하고 있다. 일반적으로 EBA 곡선은 화재지속 시간이 ZTV 곡선에 비해 길다. 그리고 EBA와 ZTV 곡선에서 중요한 요소는 냉각속도이며, 상대적으로 높은 내화성을 가지는 재료들도 냉각에 의해서 균열과 파열이 급격하게 발생할 수 있다는 것이다. 따라서 소방대의 진압작업시 주수(注水)작업으로 인해서 급격한 구조물의 냉각이 가능하므로 냉각속도에 대한 고려가 필요할 것이다. 참고로, 독일의 Weser 터널, Elb 터널과 같이 수중의 Single pan 구조로 된 터널일 경우에는 화재방지 판넬(siding)을 사용하도록 되어 있다.

- ISO(표준화재온도)곡선은 건축물의 목재계구획화재의 시험을 통해 1917년에 작성된 곡선이다. 프랑스에서는 화재발생 후 대형화재로 성장하는데 매우 긴 시간이 필요한 가연물이 통과하는 터널의 경우에 적용하는 곡선이다.

이러한 온도곡선은 예상화재의 크기와 온도에 따라 그리고 터널의 위치와 중요도에 따라 달리 적용될 수 있는데, 실제 터널구조물의 재료 물성치와 중요한 연관이 있다.

<그림 8>은 다양한 구조물 재료의 내화성과 온도곡선과의 관계를 보여주고 있다. 또한 <그림 9>은 콘크리트의 내화온도에 대한 상대적인 강도비를 나타내고 있다. 일반적으로 콘크리트는 혼합비율이나 재료에 따라 다소 차이가 있지만 250°C에서 박리가 발생하기 시작한다. 반

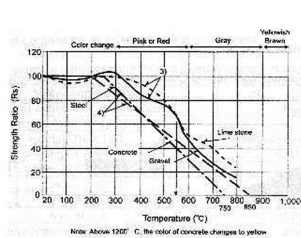
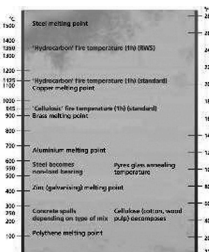
면 금속구조재료는 550°C에서 항복강도에 도달하므로 터널 피복재는 열전달을 지연할 수 있는 구조적 특성을 가져야 할 것으로 보인다.

각국은 실제 화재실험의 결과와 화재사고 경험을 통해 다양한 터널 내화성능의 기준을 제시하고 있다. 먼저 각국의 내화성능에 대한 관련 규제기준을 살펴보면 <표 6>와 같다.

각 나라별로 다소 다른 규정으로 내화기준을 정의하고 있지만, 크게 화재온도 곡선 및 지속시간, 내화피복층의 두께 그리고 화재하중 등으로 구분하고 있다. 먼저 독일(ZTV)은 일반적인 내화 피복층의 두께를 6cm 이상 확보하도록 규정하고 있으며, 프랑스(Circ2000-63A2)는 각 피난 구조물별로 화재 온도곡선 및 지속시간을 상세히 규정하고 있다. 이러한 규정은 구조물 자체의 물리적 특성뿐만 아니라 피난 및 소방을 위한 인명특성을 고려하고 있다

(표-6) 각국의 내화성능 기준 비교(N.P. Hoj, 2004)

국가	기준	요구사항
독일	ZTV 1	· 10.3 아치형 혹은 원형 터널구조물에 대한 방호 필요성은 구조물에 대한 최소한의 요구사항과 계산서에 준해서 확보되어야 한다. 일반적으로 다른 화재방호가 없다면 6cm 정도의 (터널내) 피복이 요구된다.
독일	ZTV 2	· 9.31 시간단면 터널구조물에 대한 방호 필요성은 구조적 최소 요구사항과 계산서에 준해서 확보되어야 한다. · 9.32 구조물 대체로 철근(load bearing reinforcement)은 300°C 이상의 온도에서 보호되어야 한다. 이면 도금된 철망이 (변면으로 부터) 떨어져 나오는 현상에 대한 보호로서 피복내에 배치되어야 하며 철근에 대한 최소한의 피복은 6 cm 이다.
프랑스	Circ2000-63A2	· 4.22 구조물로 요구되는 내화성능은 다음의 주요 목표를 달성하도록 설계되어야 한다. - 피난 시설로 진입한 이용자들의 보호는 그들이 출구로 나갈 수 있도록 요구되는 시간은 60분, 셸터(Shelter)내 이용자들의 보호는 120분, 화재 진입팀을 공경에 빠뜨리지 않기 위해서 20분 정도이고 모든 환경에서, 화재의 최대지속 시간은 표준 온도곡선에 대해 240분, 추가 HC 곡선에 대해서는 120분에 맞추어져야 한다.
영국	BD78/99	· 8.56 터널 구조물이나 관련된 덕트 그리고 수직경 등에 대한 화재효과는 주위 깊게 평가되어야 한다. · 8.57 화재설계에 의존해서 구조물에 대한 추가적인 화재방호 피복층(layers)은 요구되지 않을 수 있다. · 5.68 150°C의 콘크리트 천정으로부터 콘크리트의 박리(spalling)를 감소할 대책이 적용되어야 한다.
노르웨이	Road Tunnels	· 605.2 터널 구조물에 대해 요구되는 화재하중은 AADT가 10,000 미만에서는 5MW, AADT가 10,000 이상에서는 20MW에 대한 화재하중으로 설계되어야 한다. 구조적 붕괴의 위험을 가진 터널에 있어 설계화재하중은 별도로 평가되어야 한다.
오스트리아	RVS	· 9.234 중간 천정(Intermediate ceilings)은 화재등급 F90(90분 내화)에 따른 내화성능을 가져야 한다.



<그림 8> 재료와 온도곡선의 비교 <그림 9> 콘크리트의 내화강도비교

는 점에서 다른 나라들의 기준들 보다 상당히 강화된 내화 기준으로 평가되어 진다. 그리고 오스트리아(RVS)는 90분 내화지속시간을, 영국(BD78/99)은 환기방식 등을 고려한 화재영향 분석후 피복재라든지 구조물의 화재온도에 대한 박리가 일어나지 않을 대책을 강구하도록 규정하고 있다. 반면 노르웨이(Road Tunnels)는 구조물에 대하여 교통량(AADT)에 따른 설계화재화중(MW)에 준하는 내화기준으로 적용하도록 되어 있는데, 이는 구조물에 대한 별도의 내화기준이 없는 국내의 설계실정과 비슷한 내화설계 경향을 보여준다.

< 표 7 >는 국제도로상설회의(PIARC, Permanent International Association of Road Congresses)의 설계 기준용 지침이다.(PIARC, 1999) 이 표는 교통형식과 터널구조물의 형태에 따른 온도곡선과 내화시간을 규정하고 있다. 그러나 PIARC의 권고안에는 다중차량화재에 대한 언급이 없다. Ingason(2001)은 실제 터널 화재사고는 PIARC에서 제시하는 값보다 2~3배 큰 HRR 값을 보일 수 있으며 이에 따라 인접한 중차량으로 화재가 쉽게 확산되는 잠재적 위험을 지적하고 있다.

(표-7) 내화성능에 대한 PIARC 권고(PIARC, 1999)

교통형식	주요 구조물				2차 구조물			
	침매터널 혹은 구조물하부 통과형터널	불안정 지반의 터널	안정 지반의 터널	개착식 터널	환기덕트	외부로 연결된 비상탈출구	상대터널로 연결된 비상탈출구	셀터
승용차 /벤	ISO 60분	ISO 60분	-	-	ISO 60분	30분	ISO 60분	ISO 60분
트럭 /탱커	RWS/ HCinc 120분	RWS/ HCinc 120분	-	-	ISO 120분	30분	RWS/ HCinc 120분	RWS/ HCinc 120분

국제터널협회(ITA, International Tunnelling Association)도 PIARC의 기준과 각국의 기준들을 비교한 결과를 < 표 8 >과 같은 성능을 제안하고 있다.(ITA, 2004) 참고적으로 차량타입에 따른 유형구분에서, 구분1은 HGV가 없는 승용차만의 화재사고를, 구분2는 대형 로리(Lorry)와 같은 HGV 화재사고를 의미한다.

(표-8) 내화성능에 대한 ITA 권고(ITA, 2004)

구분	화재차량 대수	침매터널	불안정 지반의 터널	안정 지반의 터널	개착식 터널	환기덕트	외부 연결 탈출구	상대터널 연결 탈출구	셀터
1	1-2	ISO 60분	ISO 60분	-	-	ISO 60분	ISO 30분	ISO 60분	ISO 60분
1	>3	ISO 60분	ISO 60분	-	-	ISO 60분	ISO 30분	ISO 60분	ISO 60분
2	1-2	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간	-	-	ISO 2시간	ISO 30분	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간
2	>3	RWS/ HCinc 3시간	RWS/ HCinc 3시간	-	-	ISO 2시간	ISO 30분	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간

PIARC이나 ITA의 권장사항을 고려할 경우, 대체적으로 낮은 화재규모(승용차량 화재)로 계획되는 터널의 내화시간은 60분 정도, 상대적으로 높은 화재규모(트럭화재)로 계획되는 터널은 내화시간 120분 정도로 나타나고 있다. 그러나, 대피안전환경이 좋은 경우(즉, 터널본선에서 외부로 연결되는 탈출구가 있을 경우는) 내화시간이 낮아져 ISO 30분을 권장하고 있다. 반면 PIARC의 권장사항은 단일차량 화재특성을 고려한다면, ITA의 권장사항은 다중차량 화재특성을 고려하고 있는데, 수중(침매)터널이나 불안정한 지반상태의 터널일수록 상대적으로 높은 3시간 정도의 내화시간을 권장하고 있다.

더불어 최근 ITA에서 제시하고 있는 터널 구조물의 각 재료들에 대한 내화온도 조건을 살펴보면 다음과 같이 요약된다.(Russell, 2004)

- 콘크리트(벽면, 천정, 분리벽, 캐스트인플레이스 콘크리트 등)의 표면은 최대 380℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 프리캐스트 콘크리트(높은 강도의 콘크리트 세그먼트, 프리캐스트 보드 등)는 최대 200~250℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 콘크리트 천정은 표면온도 380℃에서 최소한 2시간 동안 붕괴되지 않도록 적절히 보호되어야 한다.
- 점토질 벽돌이나 애쉬어(asher) 스톤은 중요하게 고려될 필요가 없으며, 보호될 필요는 없다.
- 세그먼트 스틸 라이너는 표면최대 온도가 550℃ 이

내로 보호되어야 한다.

- 세스먼트 라이너의 유도 조인트는 최대 200℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 발화성 세라믹 타일 마감은 최대 200℃ 이내에서 폭발적으로 쪼개지는 현상으로부터 보호되어야 한다. (주, 신규터널에는 회피되어야 한다.)
- 세그먼트 캐스트 강철 라이너는 최대 표면온도 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 스틸 구조물과 천정의 행거 로드(hanger rods)는 최대 온도 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 캐스트 강철 구조물과 천정의 행거 로드는 최대 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 스텐레스 스틸 구조물과 천정의 행거 로드는 최대 800℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 앵커리지(Anchorage)는 양카 고정시 최소 안전율 3.5 이상으로 설계되어야 한다. 고정방법은 토대에 묶는 방법과 부착하는 방법을 의미한다.
- 에폭시 레진 양카는 표면온도 200℃ 부터 6cm 깊이에서 보호되어야 한다. (주, 프랑스에서는 300℃ 이상이 될 수 있는 환경에서는 에폭시 양카의 사용을 금지하고 있다.)
- 모든 에폭시 양카는 양카가 설치되는 곳의 콘크리트나 재료의 표면으로부터 6cm 보다 짧지 않는 바운드 존(bond zone)을 가지고 설계되어야 한다.
- 리드 쉴드 양카나 납 성분을 가진 양카는 구조적으로나 비상장비의 지지용으로는 허용되지 않는다 (예, 댐퍼, 환기팬 등)
- 황동, 아연 혹은 낮은 녹은점을 가지는 양카는 구조적으로나 비상장비의 지지용으로는 허용되지 않는다 (예, 댐퍼, 환기팬 등)
- 모든 내화성 재료는 부착물이 퇴화되거나, 물로부터 내화성능율이 저하되어서는 않된다.
- 터널 구조물내 혹은 터널내 연관되어 있는 모든 재료는 비독성, 불연성이어야 한다.

- 설치되는 모든 비상장비는 PIARC의 기준이나 개별 국가적 코드, 법령 그리고 규정 등에 적합하게 따라야 할 것이다.
- 비상 진입로/탈출구 지역은 PIARC의 기준이나 개별 국가적 코드, 법령 그리고 규정 등에 따라 통로의 최대온도가 40℃를 초과하지 않도록 설계되어야 할 것이다.

### 3. 결론

이상으로 도심지 지하차도의 방재대책에 관한 주요 사항들을 살펴보았다. 국내외적으로 지하차도에 관한 방재기준이 체계적으로 정립되어 있지는 않지만, 향후 도심지 지하차도의 단면특성을 고려한 설계화재강도의 정립, 본선터널과 진출입 접속부 사이의 상대적으로 긴 연장에서 피난대책의 수립, 환기방식에 적합한 비상전원공급 계획, 기타 국내외 방재기준의 검토를 통해 보다 과학적이고 합리적인 방재시설물을 계획할 필요가 있다.

또한 최근 이슈화가 되고 있는 구조물의 내화기준과 관련하여서도 상대적으로 취약한 확폭 및 축소부, 피난연결통로 접속부 및 JCT, IC구간 등 진출입 접속부 등에는 별도의 내화강도에 대한 기준이 정립될 필요성이 제기되고 있다. 특히 한강하저구간을 통과하는 구간 등에 대해서는 별도의 수방대책과 함께 화재시에도 구조물의 붕괴를 방지하기 위한 대책이 강구되어야 할 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. 박경부, "일본의 방재 관련 대책", 한국방재협회, 2003.2.14
2. PIARC, "Fire & smoke control in road tunnels"(Ref. 05.05.B), 1999
3. Harold, E. "Bud" Nelson and Hamis A. Maclennan., "Emergency Movement", The SFPE handbook of Fire Protection Engineering 2nd Edition, pp3-286

4. United Nations Economic Commission for Europe(UN/ECE), Inland Transport Committee, Ad Hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, "Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels(final report, English edition)", 2001.12
5. NFPA 502, "Standard for Road tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", 2001 Edition
6. ITA(Russell), (2004), "ITA Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels", Fire Safety in Tunnels, pp.72-81
7. A. HAACK et al, "Ventilation for fire and smoke control: Recommendation design fires", 99 PIARC CD Reports
8. A. Haack, S. Estefania, (1999), "Design Fires and Objectives for Tunnel Structures Resistance to Fire", PIARC CD-Reports
9. SP, (2004), Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, SP Fire Technology(Sweden), SP REPORT 2004-05
10. H. Ingason, A. Lonnermark, (2004), "Recent Achievements regrading Measuring of Time-heat and Time-Temperature Development Tunnels", Safe & Reliable Tunnels, pp.87-96
11. H. Ingason, (2001), "An Overivew of vehicle fires in tunnels", 4th Int. Conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, pp.425-434
12. Y. Ota, et al, (2001), "A study on thermal analysis for tunnel structures in the incidence of fire", 4th Int. conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, pp151-160
13. N.P. Hoj, (2004), "Guidelines for Fire Safe Design Compared Fire Safety Features for Road Tunnels", Safe & Reliable Tunnels, pp.127-138
14. 최순욱, 장수호, 김영진, 안정수, 김효규, "CFD해석에 의한 지하구조물 화재시나리오 도출", 제34회 대한토목학회 정기 학술대회 및 CIVIL EXPO 2008, P4115-4118, 2008.10.31
15. 터널공학회, 도로터널 방재시스템 개선연구(최종보고서), 국토해양부, 2008
16. 도로설계편람, 국토해양부, 2010