

도심지 대심도 장대지하차도의 방재 대책

- 김 남 영 / (주) 삼보기술단, n220911@naver.com
- 조 종 복 / (주) 삼보기술단, samboeng@empas.com
- 김 재 완 / (주) 삼보기술단, samboeng@empas.com

자동차의 대중화와 인구집중화로 인하여 대도시의 경우 지하공간에 도로를 설치하려는 계획이 많아지고 있다. 그 계획에 대하여 장점을 찬성하는 사람들도 있지만 안전에 관하여 많은 사람들이 우려를 하고 있다. 그러므로 장대지하차도의 국내외 사례를 확인하고 재해에 대한 방재 대책에 관하여 살펴보고자 한다.

서 론

자동차의 대중화와 인구집중화로 인하여 도심지 도로는 정체가 심화되고 있다. 이를 개선하려면 도로를 신설해야 하지만 토지보상비의 급등, 환경공해에 대한 민원 등으로 인해 지상도로의 확충에 어려움을 겪고 있다.

따라서, 대도시의 경우 지하공간에 도로를 설치하려는 계획이 많아지고 있다. 특히 기존 도로 및 공공용지의 지하공간을 활용할 경우 건설비용 등 경제적인 측면에서도 매우 유리하며, 노선거리의 직선화로 운행소요시간 단축 및 고속화가 가능하다. 또한 지상도로의 다이어트로 인하여 녹지공간을 확충할 수 있으며, 지하도에서 발생하는 오염물질을 정화하여 배출함으로써 대기질의 개선이 가능하다.

이러한 상황에 발맞추어 서울시에서는 2009년 8월에 서울 도심 지하 40~60m 깊이에 6개 노선, 149km의 승용차 전용도로망을 건설하고 지상공간에는 녹지공간을 확보하겠다는 U-Smartway 계획을 발표하였다. 그 계획에 대하여 장점을 찬성

하는 사람들도 있지만 안전에 관하여 많은 사람들이 우려를 하고 있다. 그러므로 장대지하차도의 국내외 사례를 확인하고 재해에 대한 방재대책에 관하여 살펴보고자 한다.

지하차도의 재해

지하차도 재해의 종류에는 터널내부와 외부의 공기환경과 화재, 합류 및 분류부의 교통사고, 누수 및 침수, 장거리 운전에서 따른 집중력저하로 인한 사고 등이 있다. 이러한 재해 중 인명피해는 거의 대부분 터널내 화재에서 일어나고 있다.

공기질(Air Quality)

장대지하차도 내부는 자동차 배기가스에 의한 오염된 공기 때문에 쾌적하지 않은 환경이 유지되기 쉬우며, 2차 사고를 유발할 수 있다. 쾌적한 환경을 제공하기 위해서는 신선공기를 공급하고 오염된 공기를 외부로 배출하여야 한다.

미래의 자동차는 엔진 성능의 개선으로 매연이나 CO, NOx 등 오염물질 발생이 적어질 것이며, 소형차 전용도로의 경우 오염물질은 일반 지하차도에 비해 적게 발생할 것이다. 또한 전기자동차, Hybrid자동차 등은 터널내의 공기환경 개선에 기여할 것이라고 판단된다.

하지만, 장거리 터널을 운전해야 하므로 터널내에 체류하는 시간이 길어, 터널내 오염농도는 낮게 유지되어야 하므로 환기량은 크게 줄어들지 않을 것이다.



아울러, Network형 도심지 지하차도는 본선과 IC(Interchange), JCT(Junction)가 지하에서 연결되므로 교통량의 변화, 교통속도의 변화에 따라 상호 환기구역간에 간섭이 심하므로 환기방식 결정에 있어서 주의해야한다.

또한 JCT에 의해 모든 방향의 차도가 하나의 공간으로 연결되므로 화재시 제연경계가 불명확해지므로 그에 대한 대책도 요구된다.

따라서, 환기시설은 화재시 제연이나 배연으로 사용되는 중요한 시설이므로 환기와 제연을 고려하여 선정되어야 한다.

관련기준

환기에 관련된 기준은 도로설계 편람과 세계도로협회(World Road Association, 구 명칭PIARC)의 환기설계기준에 따라 차량에서 나오는 오염물질량과 그 배기가스에 포함된 오염물질을 처리하기 위한 소요환기량 계산, 덕트내 마찰계수와 풍속 등을 규정하고 있으며, 터널의 경사도, 터널이 위치한 해발 높이, 속도에 따른 보정계수 등도 규정하고 있다.

규정에 따라 환기량이 산정되면 환기방식을 선정하는데 대표적인 환기 방식은 종류식 환기방식과 횡류식 환기방식이 있으며, 환기방식 선정은 터널제원과 외부환경 등을 고려하여 선정한다.

종류환기방식은 터널의 차량진행 방향으로 환기를 시켜 오염물질을 제거하는 방식으로 이에 필요한 추력은 교통환기력과 제트팬, 축류팬과 덕트를 이용한 축방향 힘으로 발생시킨다.

횡류환기방식은 지하차도 내부에 급기와 배기풍도를 설치하여 환기를 하는 방식으로, 교통정체 화재시 배연이 가능하므로 종류식보다 안전한 대피가 가능하여 도시지역터널에 많이 사용한다.

터널내와 외부 공기환경 유지 대책

필요 환기량은 체류시간에 따른 허용 농도 기준을 만족하는 양이 되어야 한다. 장대지하차도를 통과하는 시간이 30분 이상이 될 수 있는데, 30분 체류시 세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 일산화탄소 노출기준은 50 ppm이다.

반면에 국내 터널의 규정 농도는 70 ppm으로,

기준 환기량보다 실제 필요 환기량이 크므로 설계시 고려되어야 한다.

지하차도의 내부 환기방식은 Network 지하차도의 특성인 본선과 IC, JCT에서 교통량, 교통속도의 변화에 의해 환기의 요소가 상호간섭이 심하므로, 환기구간이 독립적으로 제어가 가능하고 화재시 배연에 의한 대피안전성 확보가 가능한 횡류환기방식이 적절하다. 다만, 풍도 설치에 따른 굴착단면 증가로 공사비가 높으므로 풍도면적 감소를 위한 방안이 별도로 요구된다.

지하차도 환기소에서 배출되는 오염물질을 제거하기 위한 처리기는 분진과 CO나 NOx의 농도가 저농도이므로 기기 선정에 어려움이 많고, 전력비가 많이 소요되므로 합리적인 계획이 필요하다.

화재

터널은 반밀폐 공간이므로 화재시 열기류 및 연기로 인해서 인명 및 물적 피해가 개방공간에 비해 클 우려가 있으므로 안전대책이 필요하다. 또한 화재 피해에 대한 보수시 자동차의 통행이 제한되므로 사회적 손실 등 2차적인 손실이 있다. 그러므로 도심도 장대터널의 건설계획 및 설계시 화재에 대한 안전 확보를 최우선으로 하는 계획을 하여야 한다.

국내의 화재사례

우리나라의 터널 주요사고 및 화재사례는 (표 1, 그림 1~2 참조)에서 알아볼 수 있다. 도로터널의 경우 유럽의 경우와 같이 대형 참사는 발생하지는 않았으나, 불행하게도 2003년 2월18일 대구 지하철의 화재는 지하구간에서의 대형 참사이다. 2005년 구마고속도로 달성터널의 경우 화물차량에 화재가 발생하여 탑재된 미사일 추진체가 폭발하는 사고가 발생하였다.

해외화재 사례

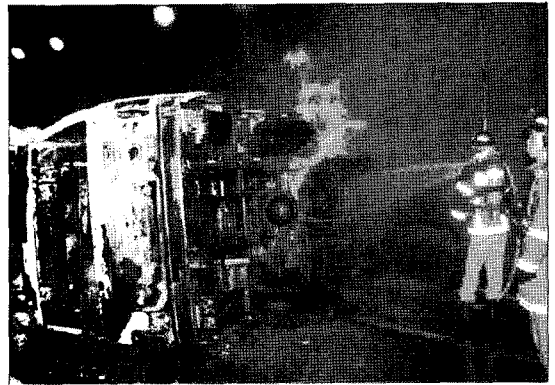
최근의 해외터널 화재는 수송량의 증대와 터널의 장대화에 따라 각지에서 대규모 화재가 발생하였고, 터널 사고율도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 화재 사고도 연간 20 ~ 30건 정도의 비율로 발생하고 있다. 표 2는 해외장대터널의 화재사고 사례를 나타낸 것이다.

<표 1> 우리나라 터널의 주요사고 및 화재사례

터널명	연장(m)	일자	사고상황	피해현황
문경새재터널	2,635	08.09.07	• 승용차 터널 회차로 인근 벽에 부딪친 후 화재	1명 사망
창원1터널	2,566	08.03.31	• 화물차 엔진 결함	0.2억 피해
용담터널	853	07.12.13	• 카니발 승합차 차량 폭발	1명 사망, 0.07억 피해
와촌터널	2,992	07.06.05	• 화물차량의 엔진 과열로 화재 발생	0.03억 피해
통영2터널	1,628	07.06.05	• 페인트 및 시너 운반 화물차 적재함에서 화재 발생	1.1억 피해
호남터널	740	07.06.02	• 견인 작업 중이던 승합차와 3대 연쇄 추돌 화재	1명 사망, 1.6억 피해
달성2터널	993	05.11.01	• 미사일탑재 트럭 화재후 폭발사고	4일간 통제, 8.7억 피해
안영2터널	600	03.07.11	• 1톤 화물차에서 매트리스 낙하, 승용차와 관광버스 추돌 (수학여행 버스 9대, 화물차 2대, 승용차 1대)	5명 부상
옥천3터널	1,613	03.06.09	• 승용차가 터널측벽 추돌, 6대 연쇄추돌	10명 부상
홍지문터널	1,892	03.06.06	• 소형버스가 승용차 추돌 후 화재	40명 부상
옥천4터널	873	03.02.10	• 화물차 자체발화 연기에 의해 후속차량 10대 연쇄추돌	-
마성터널	1,460	01.08.29	• 11중 연쇄 추돌사고	100여명 부상



[그림 1] 달성터널 화재



[그림 2] 홍지문터널 화재

<표 2> 해외장대터널 주된 화재사고 사례

터널명	국가	연장	일자	사고상황	피해현황
니혼자카	일본	2,045 m	79. 7	• 화물트럭과 승용차 추돌	7명 사망, 3명 부상 200여대 차량 전소
L'Arme	프랑스	1,100 m	86. 9	• 트럭 브레이크 파열	3명 사망, 5명 부상
Frejus	프랑스	12,870 m	83. 2	• 트럭 기어 파손	트럭 전소
Gortthard	스위스	16,918 m	94. 7	• 화물차 타이어 화재	사고차량 전소
Pfander	오스트리아	6,719 m	95. 4	• 승용차간 충돌	3명 사망
Ekeberg	노르웨이	1,560 m	96. 8	• 버스엔진 과열	8명 부상
Gortthard	스위스	16,918 m	97. 10	• 트럭간 추돌	-
M.Blanc	프랑스/이태리	11,600 m	99. 3	• 마가린 실은 화물차 엔진과열	39명사망, 차량40여대전소
Tauern	오스트리아	6,400 m	99. 5	• 페인트 실은 트럭과 승용차 추돌	12명 사망, 57명 부상, 30여대 차량 파손
Gortthard	스위스	16,918 m	01. 9	• 트럭 정면추돌	11명 사망, 80대 차량 파손



화재대책

(1) 방재시설기준

지하차도내의 화재시 방재의 기본단계는 사고예방, 초기대응, 피난대피, 소화 및 구조활동, 사고확대 방지단계로 구성된다. 국토해양부에서는 도로터널 방재시설 및 관리지침을 2004년에 제정하였고, 2009년 8월에 이를 보완하여 개정하였다.

개정된 방재기준은 터널의 위험도를 터널연장(L)기준등급과 위험도지수(X)기준등급으로 구분한다. 위험도지수등급은 사고확률, 터널특성, 대형차량 관련환경, 정체정도, 통행방식의 5가지 항목과 그에 따른 세부항목 15가지를 평가하여 산정한 위험도지수 점수에 따른 기준이며, 터널연장기준등급은 터널 길이에 따른 등급이다. 터널의 방재등급은 1등급부터 4등급으로 구분되고, 각 등급에 따라 지정된 방재시설을 설치하도록 되어 있다. 표 3은 터널연장 및 위험도지수 기준등급을 나타낸 것이다. 또한 적용기준이 미처 마련되지 않은 경우 방재시설의 설치가 모호해진다. 이러한 경우가 정량적 위험도 분석(QRA)을 수행하여 방재시설 적용 범위를 결정하여야 한다.

(2) 화재시 제연

터널 내 화재시 연기의 제연은 일반적으로 평상시 환기설비에 의해서 수행되며, 제연의 용어는 연기를 화재공간에서 덕트를 통해 연기를 제거하는 배연(Smoke Exhaust)과 대피 반대방향으로 연기 흐름을 제어하여 대피안전을 확보하도록 하는

제연(Smoke Control)의 두 가지를 통칭하며, 제연만을 별도로 구분하기도 한다. 배연은 횡류식 또는 반횡류식 환기방식에 적용되며 교통의 지체나 정체가 우려되는 도시지역의 지하차도에 많이 사용된다. 배연은 전체 배기구에서 배연하는 균일배기방식과 화재부근의 뎀퍼를 선택적으로 개방하는 대배기구방식으로 구분된다. 화재시 배연이 주행 공간에서 이루어지기 때문에 연기뿐만 아니라 주변의 공기가 유입되므로 배연량은 연기발생량보다 현저히 증가한다.

그림 3은 횡류식에서의 연기확산을 억제하기 위한 가압운전 모드를 나타낸 것이다. 제연의 경우 연기가 후방으로 역류하지 않는 최소풍속을 임계속도라 하며, 터널의 경사도와 천장높이의 영향을 많이 받는다.

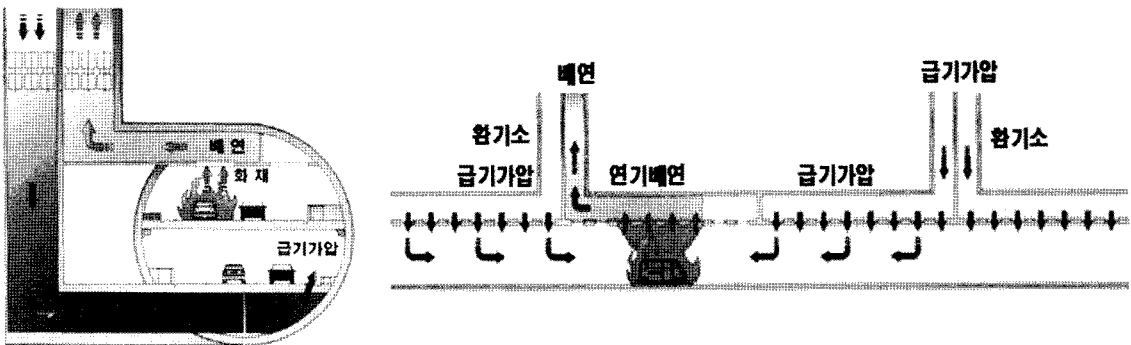
침수사고

최근 기상 이변으로 인하여 집중폭우가 많이 발생하며, 대도시의 대심도 장대터널의 경우 전체 노선이 Network 형태로 연결되어 한 곳이 침수될 경우 전체 노선이 위험해진다.

따라서 수해 방지 대책은 주변 홍수위 뿐 아니라 하수도의 역류 등을 고려한 수방대책이 요구된다.

침수사고 사례

2009년 6월에 수원 지하차도에서 전력공급 중단에 따른 침수가 발생하여 주변교통이 마비된 사례가 있으며, 2009년 7월에 광주 지하차도의 경우 하수관로 역류로 인한 침수로 인해 교통 통제가



[그림 3] 횡류식의 연기확산을 억제하기 위한 가압운전모드

<표 3> 터널방재등급 범위

등급	터널연장(L)기준등급	위험도지수(X)기준등급
1	$L \geq 3,000$ m	$X > 29$
2	$1,000 \leq L < 3,000$ m	$19 < X \leq 29$
3	$500 \leq L < 1,000$ m	$14 < X \leq 19$
4	$L < 500$	$X \leq 14$

<표 4> 등급별 방재시설 설치기준

방재시설	터널등급	1등급	2등급	3등급	4등급	비고	
소화 설비	소화기구	●	●	●	●		
	옥내소화전설비	●	●				
	물분무설비	○					
경보 설비	비상경보설비	●	●	●			
	자동화재탐지설비	●	●				
	비상방송설비	○	○	○			
	긴급전화	○	○	○			
	CCTV	○	○	△			
	영상유고감지설비	△	△	△			
	라디오재방송설비	○	○	○	△	△ : 200 m 이상 4등급터널	
	정보표시판	○	○				
	진입차단설비	○	○				
	피난 대피 설비 및 시설	비상조명등	●	●	●	△	△ : 200 m 이상 4등급터널
유도표지등		○	○	○			
피난 대피 시설		피난연결통로	●	●	●		
		피난대피터널 ⁽¹⁾	○	△			
		피난대피소 ⁽¹⁾	○	△			
비상주차대	○	○					
소화 활동 설비	제연설비	○	○				
	무선통신보조설비	●	●	●	△ ⁽²⁾		
	연결송수관설비	●	●				
	비상콘센트설비	●	●	●			
비상전원설비	무정전전원설비	●	●	●	△ ⁽³⁾		
	비상발전설비	●	●				

● 기본시설 : 연장기준등급에 의함

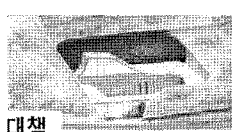
○ 기본시설 : 위험도지수기준등급에 의함

△ 권장시설 : 설치의 필요성 검토에 의함

(1) 피난연결통로의 설치가 불가능한 터널에 설치

(2) 4등급 터널의 경우, 라디오재방송설비가 설치되는 경우에 병용하여 설치함

(3) 4등급 터널은 방재시설이 설치되는 경우에 시설별로 설치함



발생하였다.

또한 2006년 7월 국지성 호우의 유입으로 침수된 정발산역에서 열차운행이 중단되었으며, 고속터미널역의 경우 연결통로 우수가 유입되어 열차운행이 중단되었다.

9호선 여의도 부근과 7호선 중랑천 부근에서 공사중에 하천수의 침수피해를 입은 사례가 있다.

침수사고 대책

(1) 수방시설기준

도시화 산업화의 가속화로 침수피해가 증가하므로 구조적으로 홍수에 강한 도시 형성을 목적으로 지하공간 침수방지를 위한 수방기준이 소방방재청 주관으로 재정되었다.

아울러 자연재해 대책법에 따르면, 수방기준 대상물을 설계, 시공하는 경우 수방기준을 적용하도록 하였고, 지방자치단체장이 수방기준 적용 여부를 확인 후 사용 승인하도록 하였다. 적용대상 시설물은 지하차도, 지하도상가, 광역전철, 지하철전소, 지하공동구, 주택, 지하 다세대주택 등이다.

(2) 수방시설에 대한 고려사항

지질조사를 위한 시추공의 유입수가 들어오지 않도록 공사중에 주의하여야 하며, 터널굴착시 용출수나 개착부의 월류수에 주의하여야 한다.

비상방수문은 공사용과 운용중 방수문이 있으며, 형식은 롤러게이트(Roller Gate)와 레디얼 게이트(Radial Gate), 슬루스 게이트(Sluice Gate) 등이 있다.

적용대상 시설물에 대한 대책은 출입구 방지턱 및 방수판을 설치하거나 모래주머니를 구비하고, 예상침수 높이 보다 높은 지점에 환기구를 설치해야 하며, 조명 및 안내표시는 비상시에도 작동하여야 한다.

배수구에는 역류방지 밸브를 설치하고, 지하공간에 배수펌프 및 집수정을 설치하며, 지하층 계단 통로와 엘리베이터 이동통로, 환기구 등의 차단방안을 강구하여야 한다.

또한 적절한 조명을 갖춘 대피경로를 확보하며, 경보방송 시설 및 CCTV 등 안전 시설을 설치하여야 한다.

운전 집중력

터널 내의 주행은 공간적 압박감과 시인성 불량 등으로 운전자에게 큰 부담을 주며, 이로 인해 터널 내 사고 발생의 가능성도 그만큼 높다. 그러므로 도로설계 단계에서부터 도로 안전성과 운전자의 생리적 특성을 미리 검증하여 이에 대한 대책을 수립하는 것이 필요하다. 최근에는 터널의 특정 제원에 따른 운전자의 생리적 영향을 주행성분석(Driving Simulation Study)을 통해 파악하여, 터널의 특정 제원을 운전 집중력이 향상되는 방향으로 개선하기도 한다.

(1) 관련기준

도심터널의 경우 운전 집중력 개선을 위한 특별한 규정은 없으나, 대도시 장대터널의 경우 단조로운 터널내를 장시간 운전하여야 하므로 조명을 보통터널보다 밝게 하거나 변화를 줄 필요가 있다. 아울러 도심의 터널은 입구가 평지에 설치되는 경우가 많으므로 터널 입구의 조명률도 높은 경우가 많으며, 조도순응시설을 설치하여 조명에너지를 줄이며 주변 경관과 차별화시키기 위해 시인성을 높일 필요가 있다.

(2) 운전 집중력 저하 방지 대책

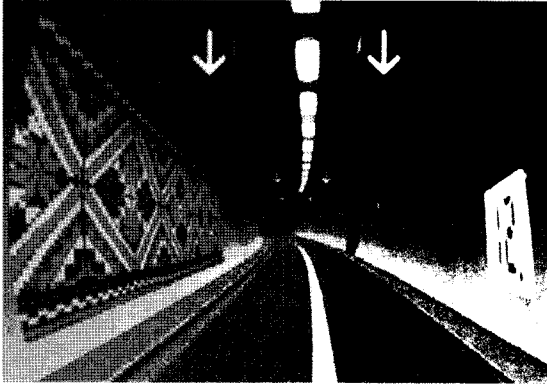
운전 집중력 저하대책으로 구간별 내부 조명디자인 또는 특수경관조명, 인공식물과 독특한 내부디자인 등이 있으며, 사례로는 그림 4, 그림 5와 같은 터널 내부디자인과 특수조명 및 인공식물을 표현한 것 등이 있다.

결론

대심도 장대지하차도의 환기량은 일반도로 터널에 비해 이용자가 터널에 체류하는 시간이 길어지므로 설계기준 오염농도 보다 낮추기 위한 환기량이 필요하다. 다만, 차량엔진개선과 전기자동차 등의 상용화로 환기량은 적어지므로 실제 필요한 환기량은 면밀한 검토가 필요하다.

환기방식은 본선과 IC, JCT 등에서 교통흐름의 상호간섭에 의한 기류 간섭이 많기 때문에 화재시 제연에 효과적인 횡류식이 적정하다.

물분무소화설비는 위험도평가 점수에 의해 설치



[그림 4] 터널 내부디자인



[그림 5] 특수조명 및 인공식물

여부가 결정되는 시설로, 소형차 전용 지하차도의 경우 연장이 길어도 설치 대상이 아니므로 해당 기관의 검토가 필요하다.

침수는 전 노선의 교통통제를 가져오므로 침수

대책에 신중해야 하며, 운전자의 지루함을 방지하거나, 지상의 위치를 추정할 수 있도록 그 지역의 이미지를 벽면에 표시하는 등의 아이디어가 필요하다. (40)