

# 도시지하도로의 환기, 방재 설비

■ 이진섭 / (주)세익엠이씨, jinsuplee@yahoo.co.kr

■ 심낙권 / (주)세익엠이씨, nkshim@lycos.co.kr

최근 화제가 되고 있는 서울시 U-SMARTWAY 계획과 관련하여 대심도 자동차전용 지하도로의 환기와 방재설비에 대하여 살펴보기로 한다.

## 지하도로환기설비

### 지하도로 환기의 필요성

지하도로를 비롯한 차량이 통과하는 도로터널은 교통시야 확보와 운전자의 위생환경을 위하여 일정량 이상의 환기가 필요하다. 또한 현재 검토되고 있는 대심도 소형차 전용 지하도로인 서울시 U-SMARTWAY의 경우에는 JCT와 같은 네트워크식 지하도로로 되어 있어 지하공간내의 열축적 부하를 해결하기위한 환기에 대한 검토도 필요할 것으로 예상된다.

### 환기량 산정

지하도로의 환기는 주행차량의 엔진으로부터 배출되는 오염물질로 불완전연소가스인 매연, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)과 바퀴와 도로의 마찰로부터 발생하는 타이어, 브레이크패드와 도로표면의 마모물질 등으로 구성된 PM<sub>10</sub> 미만의 분진을 일정 농도 이하로 제어하는 것을 주목적으로 한다.

따라서 소요환기량을 산정하기 위하여 ① 상기 오염물질의 목표 제어농도 값과 ② 표준상태에서의 차종별 오염물질 배출량이 필요하고 ③ 오염물질 배출량 변화에 영향을 미치는 인자인 차종별 교통량, 지하도로 길이, 차도단면, 표고 및 종단경사 등의 자료가 필요하다. 새로운 환기량 계산방식에는 출고연도에 따른 엔진의 오염물질 배출량의 차이를 감안하는 차령계수를 적용하기도 한다.

이렇게 필요한 환기량이 산출되면 우선적으로 교통환기력에 의한 자연환기가 가능한지 여부를 검토하고 자연환기가 불가능하거나 임의로 강제환기를 필요로 할 때는 강제 환기방식을 선정하게 된다.

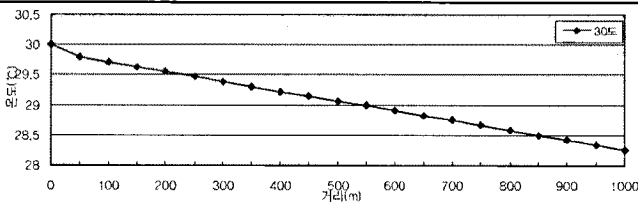
자연환기 및 각 환기방식에 따른 환기성능을 계산하려면 환기방식에 따라 적용하게 되는 종류가 약간씩 차이가 있지만 주로 지하도로의 벽면 마찰계수, 차량의 투영계수, 자연풍 속도, 자연환기력 등의 유체역학적 요소가 필요하게 된다.

### 지하도로 환기 방식

환기방식은 도로의 종방향으로 환기의 흐름을 형성하는 종류식과 도로를 가로 지르는 기류의 흐름을 형성하는 횡류식으로 대별된다.

적용되는 환기방식은 ① 터널 또는 지하도로내의 오염농도의 제어특성, ② 화재시 화재연기 제어,

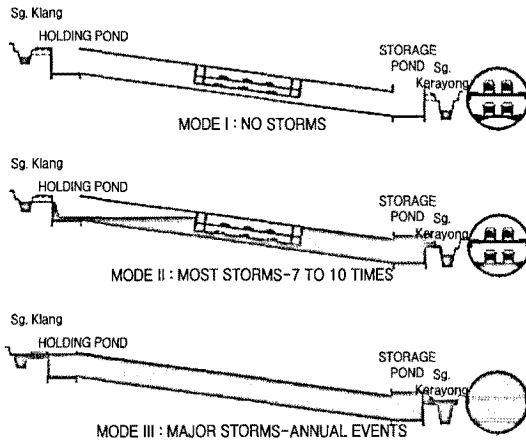
<표 1> 하절기 지중급기덕트 1km 통과시 도입외기의 온도 변화



- 지중온도 : 16°C
- 외기온도 : 30°C
- 기류속도 : 20 m/s
- 덕트크기 : 3 m × 3 m 지중매립

즉 제연 및 배연의 성능, ③ 굴착 등 터널공법에 따른 특성과 ④ 토목 및 관련된 분야의 공사비 및 준공 후의 운영비와 같은 경제성을 검토하고 예상되는 지하도로의 교통특성에 따른 환기와 제연의 중요도를 감안하여 비교 선정하게 된다. 표 2는 준공되었거나 공사 또는 설계중인 도시지하도로의 환기방식이다.

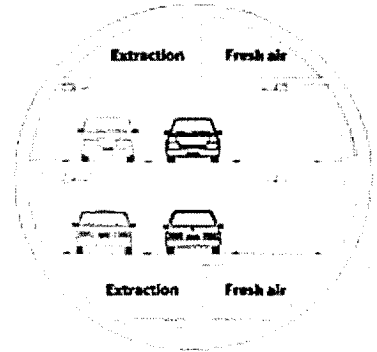
말레이시아 쿠알라룸푸르에 있는 SMART터널은 잦은 홍수로 인한 도시의 범람을 해결하기 위하여 평상시에는 교통을 위한 도로터널로 사용하다가 홍수시 터널에 홍수를 저장, 배출하는 저류조 용도로 사용하는 다목적 터널로 만들어 졌으며, 터널 전체가 만수되는 특성상 환기방식은 사칼드방식을 이용한 종류식으로 채택하였다. 환기는 터널 측면의 급기구와 배기구에서 종방향으로 급·배기



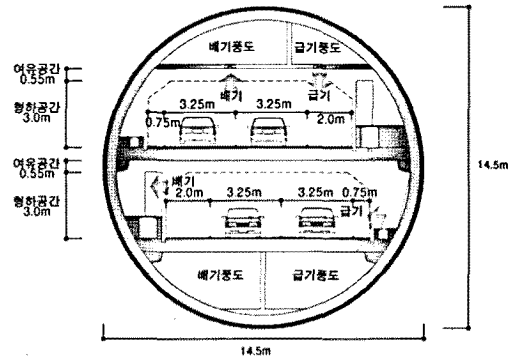
[그림 1] 쿠알라룸푸르의 SMART터널 환기구 및 홍수시 저류과정

하며 급·배기구와 덕트통로로 연결된 환기설비는 침수 높이 보다 높은 지상부에 설치되어 있다. 때로는 이렇게 터널의 사용목적에 따라 환기방식이 결정될 수도 있다(그림 1).

프랑스의 A86과 서울시의 U-SMARTWAY는 그림 2와 같이 복층으로 되어있으며 두 경우 모두 차



a) A86터널



b) U-SMARTWAY

[그림 2] 프랑스 A86 과 서울시 U-SMARTWAY 계획단면

<표 2> 각국의 도시지하도로 환기방식

터널명	국가 (도시)	터널길이(km)	환기방식	비고
A86	프랑스(파리)	10	횡류식	운영 중
M30(southern By-pass)	스페인(마드리드)	4.2	횡류식	운영 중
중앙환상 신주쿠선	일본(동경)	11	횡류식	운영 중
아쿠아 라인	일본(동경)	9.6	종류식	운영 중
대화천선	일본(오사카)	5	종류식	시공 중
정천좌안선	일본(오사카)	4	종류식	시공 중



도가 3 m 내외의 낮은 높이로 되어 있어 제연, 배연안전도 향상 목적을 배제하더라도 아래 층 도로의 경우 종류식의 채택이 어렵다.

**환기소**

길이가 긴 지하도로는 경제적인 굴착단면의 한계와 소요환기량을 구현할 수 있는 실용적인 환기성능의 한계로 인하여 환기가능길이 발생하며 이에 따른 구간별 환기소가 필요하게 된다. 서울시에 서 검토하고 있는 U-SMARTWAY는 소형차 전용도로로 터널제원 및 교통량으로 환기량을 산정하면 환기방식이 횡류식 일때 약 2 km 내외의 길이가 환기구간이 되어 약 2 km 간격의 환기소가 필요하게 되지만 중간 진출입로의 위치와 부지확보 가능 여부에 따라 위치의 조정이 불가피하게 된다.

환기소에는 외기를 취입하여 터널내로 공급하거나 터널내의 오염공기를 외부로 배출시킬 수 있는

대형 환기기(주로 축류팬)와 배출공기를 정화할 수 있는 집진설비와 집진물 처리설비, 제어실, 전기실, 소화용수 저수조 및 펌프설비가 설치되며 배출공기를 배출 확산할 수 있는 환기탑과 연결되어 있다.

사용되는 집진기의 경우 전기집진기, 제진필터등이 있으며 그림 3과 같은 종류가 있다.

**지하도로 환기제어**

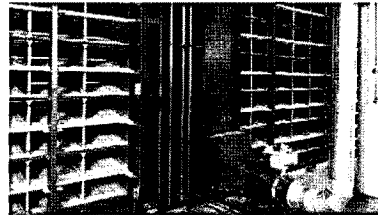
지하도로의 오염도는 교통흐름과 통과 차종 비율의 변화, 합류 및 분류 교통류의 유무등에 따라 증가 또는 감소하게 되며 이에 따른 환기운전의 제어가 필요하게 된다.

오염도 계측기는 가시도와 일산화탄소를 계측하는 VI-CO, 또는 NO<sub>2</sub>까지 계측하는 VI-CONO가 있다. 지하도로 또는 터널은 대공간이므로 오염도를 감지하여 환기모드를 바꾼다 해도 제어목표 농도



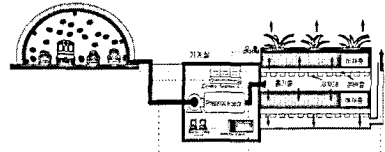
•저감 대상물 : 매연(분진)

a) 전기집진기



•저감 대상물 : 매연(분진)

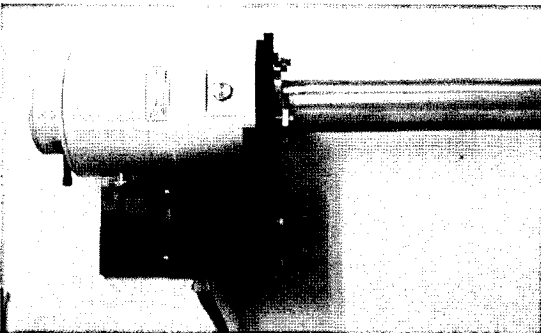
b) 제진필터



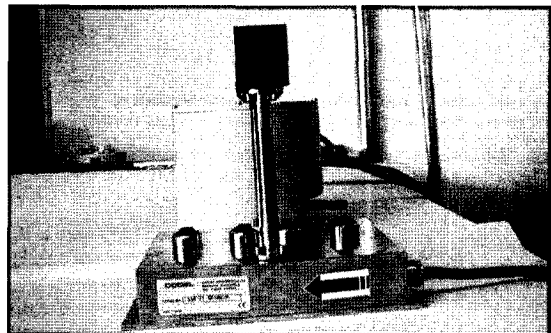
•저감 대상물 : NOx, SO<sub>2</sub>, SPM 등

c) NOx정화설비

[그림 3] 도로터널용 집진설비의 종류



a) 오염물질 계측기



b) 풍향·풍속계

[그림 4] 터널내 계측기

까지 도달시키기까지는 지연시간이 발생한다. 터널 환기는 환기량 단위를  $m^3/hr(CMH)$ 가 아닌  $m^3/s(CMS)$ 로 표현할 정도로 일반 환기와 비교하여 상당히 큰 용량으로 환기에 소요되는 환기소 환기기의 한 대당 모터 동력이 대부분 100kW를 초과한다.

따라서 제어 응답 시간의 단축과 에너지 절약을 위하여 다양한 제어방식에 대한 연구가 진행되고 있다.

그 중의 하나를 소개하면 요일별 시간대별로 교통량과 정체정도, 이에 따른 오염농도를 통계, 분석하여 이를 토대로 예측제어를 방법이 있다.

위와 같은 환기제어의 패턴을 추출하고 예측하기 위하여 부가적인 계측기가 필요하게 된다. 차종별 교통량 측정을 위한 교통량 측정계와 풍향과 풍속을 측정하는 풍향풍속계가 있다.

## 지하도로 방재설비

### 방재설비의 중요성

길이가 긴 지하도로는 토지 소유권의 한계 깊이 및 기존의 지하시설(지하철 등)의 간섭을 해결하기 위하여 대심도가 되며 서울시 U-SMARTWAY는 지하 50 m 이하의 심도로 계획되고 있다.

대심도 지하도로의 경우 폐쇄성으로 인해 화재 및 사고시의 대처가 가장 중요한 과제가 되고 있다. U-SMARTWAY 계획에서도 그동안의 지하철 같은 지하 공간 건설에 대한 우수한 경험으로 인하여 대심도 터널의 구조와 시공 문제에 대한 논란은 없었지만 교통사고, 특히 화재시의 안전문제에 대한 상당한 우려와 이견이 있었다.

대심도 지하도로 화재 시에는 인적 피해 방지를 위하여 이용자의 안전한 대피가 최우선 과제로 된다. 지하도로 또는 터널에서의 대피는 종국적으로는 터널외부로의 탈출, 즉 지상으로의 대피를 뜻하며 앞서 언급한 복층터널의 경우는 아래 또는 윗층의 안전한 공간을 통하여 지상으로의 탈출을, 쌍굴일 경우에는 안전한 반대편 터널로 이동하여 지상로의 탈출을 의미한다.

지하도로에 적용되는 소화설비는 소화기, 소화전, 물분무 설비등이 있으며 이에 대한 내용은 여

러 기고문에서 소개되고 있으므로 자세한 설명은 생략한다.

### 방재설비의 적용

2003년 대구지하철 화재 사건 후 지하공간의 안전에 대한 경각심이 높아졌으며 많은 연구가 현재까지 이루어지고 있는 실정이며 국토해양부는 2004년에 도로터널 방재시설 및 관리지침을 제정하였고 2009년 4월에 이를 보완하여 개정하였다.

개정된 방재기준에 의하면 터널의 위험도를 사고확률, 터널특성, 대형차량 관련환경, 정체정도, 통행방식과 같은 5가지 위험인자와 이에 따른 총 15가지의 세부항목을 평가하여 산정한 위험도지수 기준등급과 터널 길이에 따른 터널연장기준등급으로 구분하여 터널의 방재등급을 정한다. 터널의 방재등급은 1등급부터 4등급으로 구분되고 각 등급에 따라 지정된 방재시설을 설치하도록 되어 있으며 1등급이 가장 엄격한 방재시설을 요구하는 등급이된다.

적용기준이 중첩되거나 기준이 미처 마련되지 않은 경우의 해당 방재시설의 설치가 모호해 지는 경우가 발생하는데 이 때는 정량적위험도분석(QRA)를 수행하여 방재시설적용 범위를 결정하기도 한다.

### 화재연기의 거동과 대피

지하도로 내에서 차량의 사고로 화재가 발생하면 화재연기는 상부로 발달하여 도로 상부를 따라 확산되다가 차도 상부 면과의 열교환으로 온도가 하강하면 하부로 침강하게 된다. 화재연기는 대피진로 인지를 위한 시야를 차단하고 함유한 독성가스로 인체에 해를 입히게 된다. 이중에서 혈중의 일산화탄소량의 증가는 혈중 헤모글로빈 수치의 상승을 막아 치명적인 영향을 주게 된다.

화재시 안전한 대피의 가능성을 판단하기 위해서는 화재연기의 침강시간과 이용자가 안전장소로 이동할 수 있는 대피 소요시간의 비교가 필수적이다.

일방향 도로의 경우 가장 불리한 경우의 화재연기의 거동을 예측해 보면 다음과 같다(그림 5).

상황은 내리막 길에서 주행 중 사고에 의하여 차량에 화재가 발생하고 사고 후 모든 차량은 정지해



있다고 가정하고 사람들은 차량의 후방, ⑥방향으로 이동하여 최단거리에 있는 피난통로를 통해 반대편 지하도로로 대피하는 것으로 설정한다.

화재가 발생하면 화재 전까지 형성되었던 진행 방향 기류의 관성에 의하여 초기에는 연기는 ③의 방향으로 전파된다. 시간이 흐름에 따라 차도내 기류의 관성력은 작아지고 뜨거운 공기의 부력에 의하여 오르막 경사방향인 ⑥방향으로 진로가 역전되어 대피자 방향으로 추격한다.

따라서 안전한 대피의 첫째 조건은 연기의 진행이 역전된 뒤 대피자를 추월하기 전에 최종 대피자가 도달 할 수 있는 거리에 피난연결통로가 위치하여야 하는 것이다. 도로공간의 높이가 높을수록 연기의 침강시간이 지연되어 피난연결통로의 간격에 여유가 있지만 3 m 내외의 도로공간 높이를 갖는 소형차 전용 복층터널과 같은 경우에는 그 간격이 짧아지게 된다. 조건에 따라 차이가 있으나 일반적으로 200 m 내외가 된다.

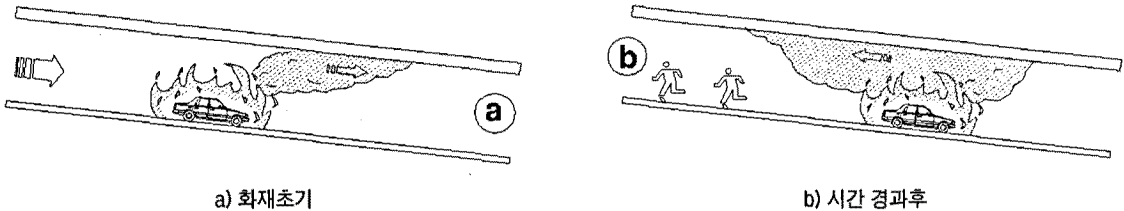
여러 가지 컴퓨터 소프트웨어가 있으나 국내에서는 대피시간을 구하기 위하여 SIMULEX라는 프로그램이 주로 사용되고 있다.

**제연과 배연**

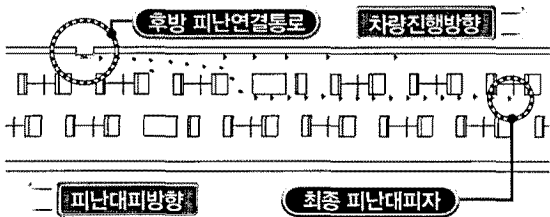
일단 화재가 발생하면 모든 환기기의 운전은 중지된 후 제연운전의 필요 여부를 결정하고 필요시 대피자의 위치, 방향을 종합 판단하여 제연운전을 시작하여야 한다. 화재시 연기량은 화재규모에 따라 결정되며 소형차의 경우 5 MW, 버스의 경우 20 MW로 산정한다. 제연은 환기기를 가동함으로써 연기의 방향을 제어하는 것을 뜻하며 제연능력은 높은 온도의 화재연기가 부력의 힘으로 확산되는 방향성을 억제할 수 있어야 한다. 배연은 문자 그대로 연기를 도로공간의 연기를 외부로 배출시키는 것을 뜻하며 환기탑의 배기구 또는 갱구로 배출한다.

종류식의 경우 화재연기의 흐름방향을 한 쪽으로 형성시켜 제연을 할 수 있으나 배출구까지는 연기의 피해를 감수해야 하므로 배출구까지의 거리가 길 경우 피해 구간이 길어 지는 단점이 있다,

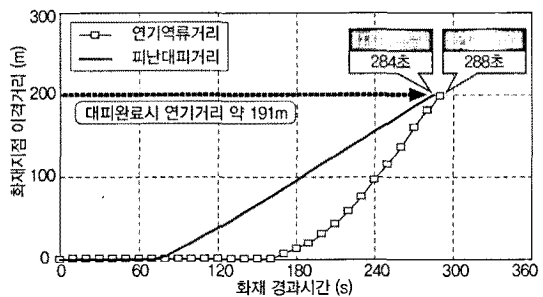
횡류식의 경우 화재 지점 부근의 배기구 댐퍼를 열고 배연을 함으로써 화재연기가 화점으로부터 멀리 확산되는 것을 방지할 수 있는 장점이 있어 화재연기의 피해구간을 최소화 할 수 있다. U-

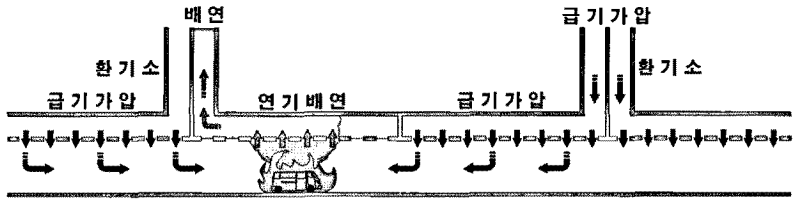
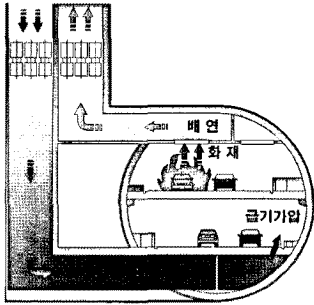


[그림 5] 내리막 경사에서의 화재연기 진행 과정

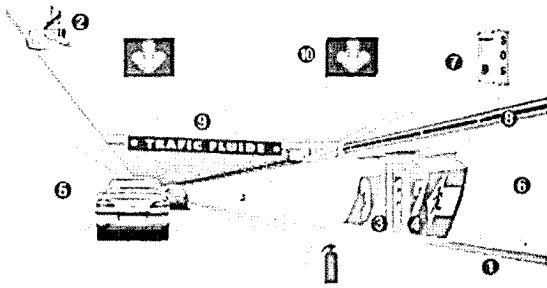


[그림 6] 피난대피 검토용 SIMULEX 프로그램





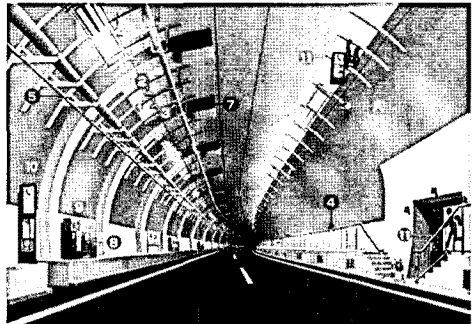
[그림 7] 횡류식에서의 연기확산을 억제하기위한 가압운전



환기방식 : 횡류식

시 설 물 : 비상주차로, 자동화재감지CCTV 미세물분무설비, 피난대피통로(400 m 간격), 배기구, LED표시등, VMS 등

a) A86 터널



환기방식 : 횡류식

시 설 물 : 비상주차로, 자동화재감지CCTV, 수막설비, 피난대피통로(350 m 간격), 배기구 등

b) 중앙환상 신주쿠선(산수터널)

[그림 8] 프랑스 A-86과 동경 중앙환상선 지하도로

SMARTWAY와 같이 낮은 도로공간에서는 도로상부에서의 화재연기 확산이 빠르게 전파되므로 대 배기구를 통한 배연운전을 시작하더라도 화재연기의 피해구역이 넓어질 수가 있다. 이러한 경우에 대처하기 위하여 인접구간의 환기모드를 급기 운전으로 전환하여 화점방향으로 압력이 가해지게 함으로써 확산을 방지할 수 있다. 또는 프랑스 A86과 같이 연기방향을 제어하기 위해 입구부에 별도의 제연팬을 설치하는 방법도 있다.

### 해외사례

도심지 지하도로 또는 터널의 내부에 설치되는

시설물의 이해를 돕기 위하여 해외 지하도로의 사례를 열거한다.

### 결 언

대심도 지하도로는 길이가 길어지므로 일반 도로 터널에 비하여 운전자가 체류하는 시간이 길어진다. U-SMARTWAY 동서3축의 경우 약 30 km의 경우가 되며 시속 60 km로 주행할 경우 30분이 소요 되고 JCT를 이용하여 타축을 경유하면 지하도로내의 체류시간이 더욱 길어질 수 있다.

따라서 기존의 터널 내 오염농도기준을 적용하기에는 무리가 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.



또한 지하 내에서 합류 또는 분류가 이루어지므로 교통흐름에 대한 변화가 오염물질 배출에 미치는 영향을 분석하여 이를 소요 환기량에 반영할 필요가 있으며, JCT구간과 인접구간과의 안정적인 환기성능 확보에 대한 검토도 필요하다.

지하도로가 50 m의 깊이에 건설되면 경사가 5% 일 경우 약 1 km의 진출입로가 필요하게 되어 진출입로에 대한 환기, 방재의 대책도 요구되는데 이

에 대한 경제적이고 안전한 구조의 방안도 도출되어야 한다.

세계적으로도 지상면적의 부족으로 지하공간의 활용이 확산되고 있으므로 지하도로는 증가할 것으로 예상된다. 이에 대비한 환경기준과 효과적인 환기, 안전이 보장되는 방재대책에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다. ㉔