

# 도로터널 내·외부 환경측정시스템

터널 환기 및 방재 제어의 기초적 역할을 하는 터널 내·외부 환경 측정(오염물질, 가시도, 풍향/풍속 등) 시스템의 일반적 사항, 국내외 기준 등에 대해 알아보고, 이에 대한 개선방안을 제시하고자 한다.

## 개요

터널 내 환기시스템(제트팬, 축류팬, 전기집진기 등)이 설치되는 도로터널에서는 환기시스템의 제어 및 운영을 위해 터널 내부의 오염물질을 실시간으로 측정할 수 있는 환경 측정기를 설치하고 있다. 터널 내부에 설치된 측정기들로부터 일정간격으로 생성되는 측정 데이터는 현장 제어반을 거쳐 터널관제센터의 제어장치로 전송되며, 미리 입력되어 설정된 한계값을 초과할 경우 자동운전 또는 중앙관제장치로부터의 수동운전 방식을 통해 환기시스템이 기동되도록 **그림 1**과 같이 구성한다. 환경측정시스템은 현장에 설치된 측정기류 및 제어반으로 구성된다.

터널의 자동제어시스템은 **그림 2**와 같이 환기, 전력, 방재를 통합 제어하도록 구성되며, 터널에 설치되는 기계, 전기, 소방, 기타 설비들을 제어할 수 있다. 또한 각 터널별 자동제어시스템은 노선별 또는 관리주체별로 통합, 관리 가능하도록 체계를 구성하고 있다.



[그림 1] 터널 환기제어시스템 구성 예

김효규

공학박사

(주)주성지앤비 대표이사

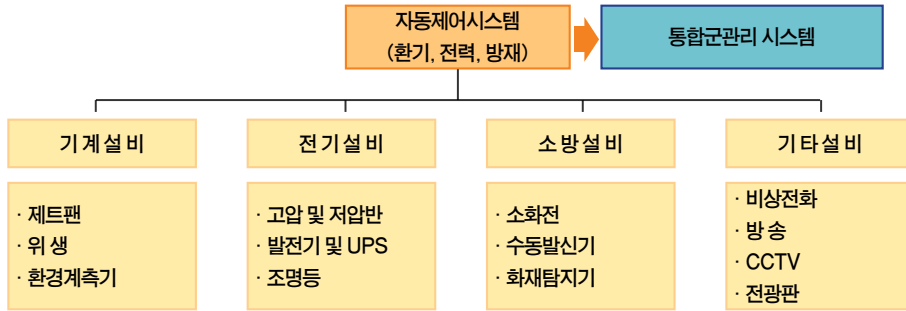
hgkim@gnbeng.com

김상철

(주)주성지앤비

기술연구소장

sckim@gnbeng.com



[그림 2] 터널 자동제어시스템 구성 예

터널 환경측정시스템은 터널 이용자에게 안전하고 쾌적한 환경 제공을 위한 환기시스템 기동 여부 판별에 중요한 역할을 하며, 이 뿐 아니라 화재 발생시 연소가스, 내부온도의 급격한 증가까지도 감지할 수 있는, 자동 화재감지 장치의 보조적 설비로서의 역할까지 수행할 수 있다.

따라서, 터널 내부의 오염 및 기상 환경에 의해 측정시스템이 영향을 받게 되어 정상적으로 측정하지 못할 경우 안전 및 비용 측면에서 문제가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 대책이 사전에 마련되어야 할 것이다.

본 고에서는 이러한 터널 환경측정시스템의 일반적 사항과 국내의 설치 기준 등에 대해 살펴보고, 가장 중요한 사후 유지관리에서의 개선방안을 제시하여 향후 효율적인 설비 운영에 도움이 되고자 한다.

## 터널 환경측정시스템 구성

터널을 통행하는 차량으로부터 배출되는 인체에 유해한 물질들은 CO, NOx, PM10, HC, 벤젠, 납

등이 있으며, 그 외의 유해 물질로 SO<sub>2</sub>, 오존 등이 있다.

터널 환경측정시스템은 환기제어 대상인 입상 물질(매연 등), 가스상 물질(CO, NOx) 그리고 풍향/풍속 측정기 외에도 온도 및 습도, 기압 등을 측정할 수 있는 측정기로 구성된다.

국내에서는 매연, CO, NOx, 풍향/풍속과 같은 주 환기제어 대상 측정기만을 터널 내부에 설치하고 있으며, 한국도로공사의 '고속도로터널 환기시설 설계기준'에서는 터널 외부용 풍향/풍속계, 기압계, 안개센서, 온·습도계 설치도 고려하고 있다. 환기제어 대상물질 측정관련 국내 기준 및 국외 기준은 각각 표 1, 표 2와 같다.

다음 그림 3~6은 터널내 오염물질 및 풍향/풍속 측정기 설치 개념도와 안개 측정기를 보여주고 있다.

## 3. 측정기 세부사항

### 일반사항

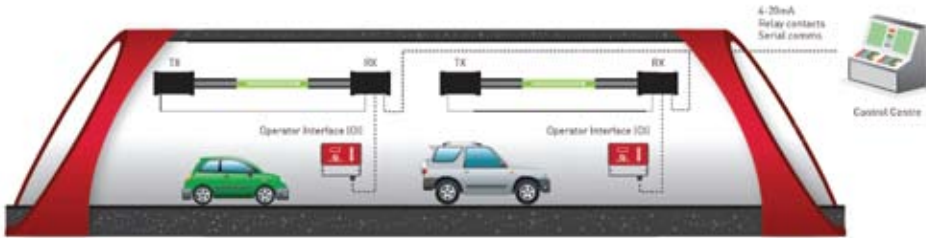
근래의 환경측정기 분야 국내 기술 수준은 환

<표 1> 터널환경 측정기 설치 국내 기준

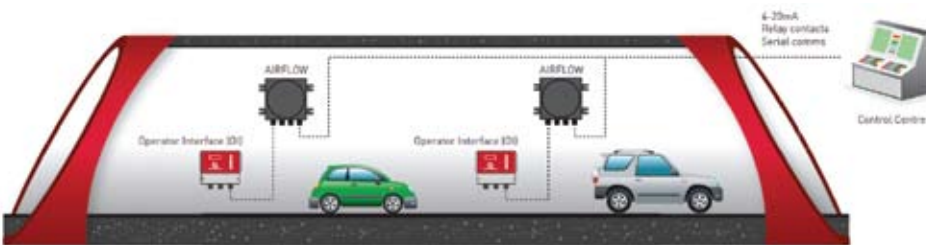
측정대상	매연	CO	NOx	풍속	비고
측정범위	0-15×10 <sup>-3</sup> m <sup>-1</sup>	0-150ppm	0-50ppm	0-20m/s	고속도로터널 환기시설 설계기준(한국도로공사)
설치높이	지상 3.5m			지상 3.8m	
설치위치	터널별 특성(교통방식, 환기방식 등) 고려하여 설치				

〈표 2〉 WRA(PIARC)의 오염물질 설계농도 권고치

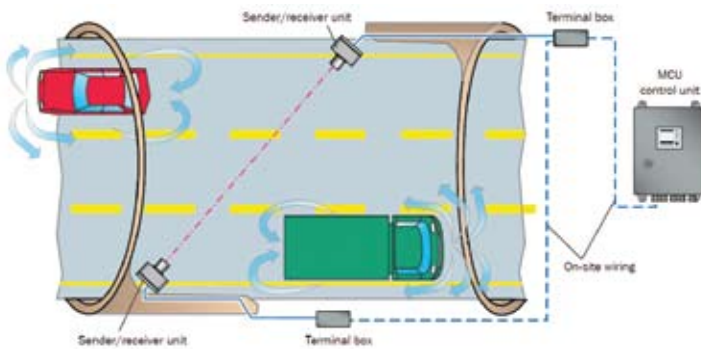
교통 상황	CO		NOx	가시도	
	목표년도			(ppm)	소광계수 K ( $10^{-3}m^{-1}$ )
	1995	2010			
	(ppm)	(ppm)			
Fluid peak traffic 50~100km/h	100	70	20	5	60
Daily congested traffic, standstill on all lanes	100	70		7	50
Exceptional congested traffic, standstill on all lanes	150	100		9	40
Planned maintenance work in a tunnel under traffic	30	20		3	75
Closing of the tunnel	250	200		12	30



[그림 3] 가시도/CO/NOx 측정기 설치 개념도



[그림 4] 풍향/풍속 측정기(1점식) 설치 개념도



[그림 5] 풍향/풍속 측정기(Cross type) 설치 개념도



[그림 6] 안개 측정기

경부 주도로 기술 개발이 상당부분 이루어져 일부 분야에서는 국산화까지 성공한 정도이다. 터널용 환경측정기의 경우 국가 연구과제를 통해 개발 진행중에 있으나, 현재까지 국내 도로터널에는 거의 대부분 고가의 외산 제품들이 설치되어 있어 도입 비용 뿐 아니라 소모품 구입 등 유지관리 비용 또한 만만치 않은 수준이다.

### 측정방식

오염물질 측정기의 측정방식에는 현장직접취부식(Insitu type)과 시료채취식(Sampling type)으로 구분할 수 있는데, 평균 농도를 대표할 수 있는 지점에 설치되어 측정되어야 하며, 부식, 먼지 침적 등 터널 환경과 화재시 내화온도 등을 고려하여 재질을 선정하여야 한다. 측정방식간 비교는 표 3과 같다.

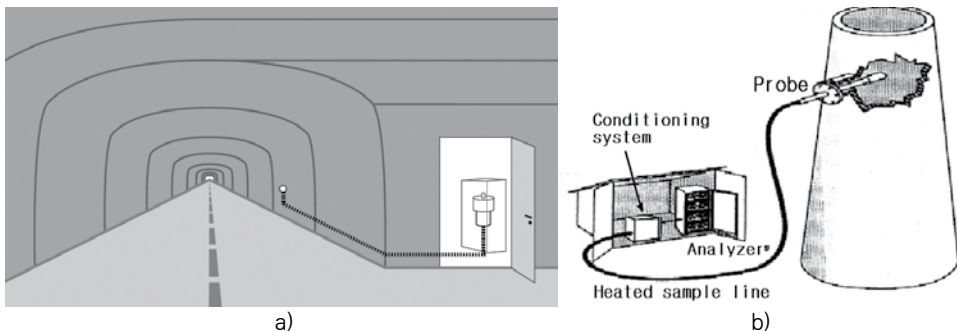
그림 7a)는 시료채취 방식의 가스상 오염물질 측정시스템을 터널에 배치한 모습이며, b)는 시료 채취용 프루브(Probe)와 시료 이송용 도관(Sample line)만 노출되고 측정시스템(Sample conditioning system & Analyzer)은 별도 공간에 위치함을 보여주는 도식도이다.

측정시스템은 터널내 항온항습 기능이 있는 셀터 또는 대피통로 공간에 독립적으로 위치시킬 수 있다. 측정대상 오염물질 샘플링을 위한 시료 채취용 프루브 및 시료 이송용 도관은 외부에 노출되어 있으므로 특히 파손되지 않도록 주의하여야 한다. 국내에서는 측정시스템의 복잡성, 관리 어려움 등의 이유로 거의 적용하지 않고 있다.

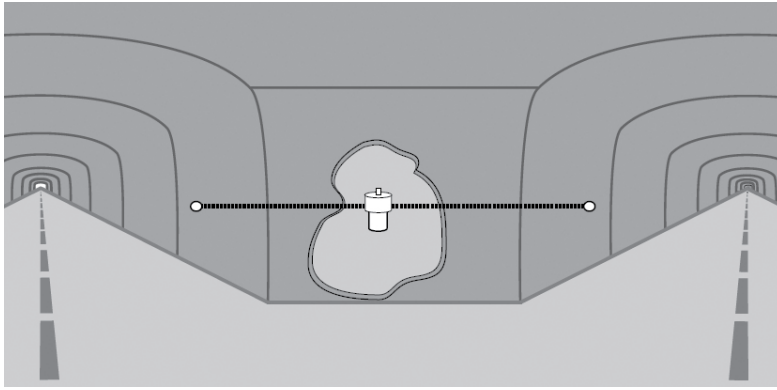
그림 8과 같이 쌍굴 터널 조건에서 시료채취식을 적용할 경우, 한 개의 측정시스템에 다수의 시료 채취용 프루브 및 시료 이송용 도관을 연결할 수

〈표 3〉 측정방식 비교표

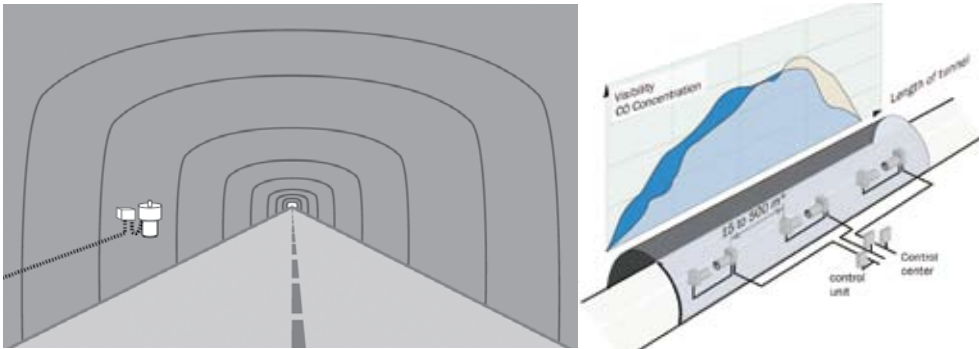
항 목	현장직접취부식	시료채취식
측정의 대표성	평균농도 대표지점에서 측정 수행	
설치환경	외기에 노출되어 있어 온도, 진동 등의 영향 받음	측정기가 별도 셀터(Shelter) 내에 위치하므로 양호한 환경(항온, 항습 필요)
부속장치	부속장치가 적음	전처리 시스템 등 부속장치가 다수 있음
측정의 정확도	시료채취식에 비해 오차 큰 편	수분, 온도, 기압, 타가스 등이 보정되므로 정확도 우수
교정	내부 가스셀에 의해 교정하는 방식이며, 표준가스에 의한 교정시 별도의 교정장치 필요	표준가스에 의해 교정하는 방식, 셀터 내 표준가스 구비
응답시간	비교적 빠름(수초 내)	시료도관 길이에 따라 다름(수분 소요)



〔그림 7〕 시료채취식 측정기



[그림 8] 쌍굴 터널에서의 시료채취식 측정기 적용



[그림 9] 현장직접취부식 측정기

는데, 쉘터에 측정시스템을 위치시키고 시료 이송용 도관을 상행, 하행 터널에 각각 연결하여 구성할 경우 비용 절감과 효율적인 관리가 가능하다.

**그림 9**는 터널 내부 측면에 발/수광부(Sender/Receiver unit)와 반사부(Reflector unit)가 서로 마주보게 고정, 설치하는 현장직접취부 방식으로 구성요소가 아주 간단하다. 그러나 외부에 측정시스템 전체가 노출되어 있으므로 진동, 온도, 먼지 등 터널 내부 환경에 의해 측정값에 영향을 받을 수 있다. 특히 측정시스템의 핵심요소인 광학부(렌즈)에 먼지, 수분 등 이물질이 침적되지 않도록 주기적인 관리가 필요한데, 해당기능이 탑재된 장비를 선정함으로써 해결할 수 있다.

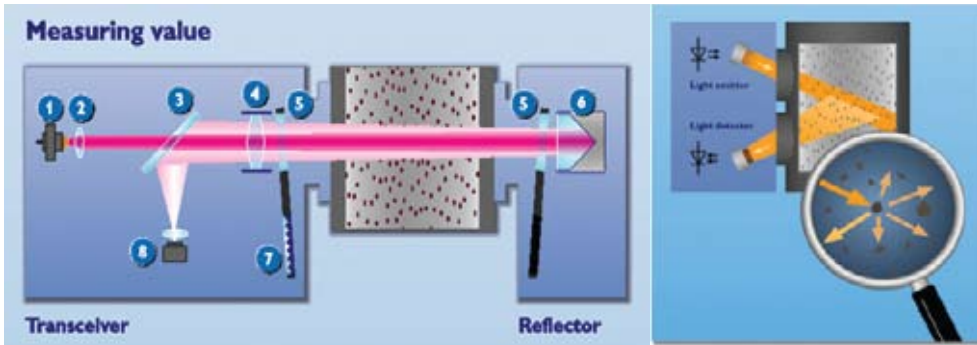
### 입자상 물질 측정기

차량 배기구로부터의 매연, 차량 타이어와 도

로면과의 마찰에 의한 분진, 터널 구조물의 풍화 등 다양한 원인으로부터 발생하는 입자상 물질의 농도 측정은 일반적으로 **그림 10**과 같이 광투과 방식(Light Transmission) 또는 광산란방식(Light Scattering)이 적용된 측정기를 이용한다.

광투과방식은 발/수광부로부터 투사된 광량과 반사부를 거쳐 반사되어 돌아온 광량을 측정하여 먼지농도를 산출하는 방식으로, 측정광을 주사하여 흡수, 반사, 산란된 광을 제외한 투과된 광의 강도를 측정한다. 고농도의 먼지 측정에 적합한 방식이며, 습한 환경에서는 물의 미세입자에 측정광이 산란되기 때문에 측정기의 농도값이 증가하고 광원이 투과가 어려워 측정이 불가한 단점이 있다.

광산란방식은 투사된 광량과 산란되어 다시 돌아온 광량을 측정하여 먼지농도를 산출하는 방식이며, 저농도의 먼지 측정에 적합하다. 광투과방식



[그림 10] 광투과방식(좌) 및 광산란방식(우) 개요도

과 마찬가지로 수분이 있는 환경에서는 농도값이 다소 높게 측정되는 단점이 있다.

### 가스상 물질 측정기

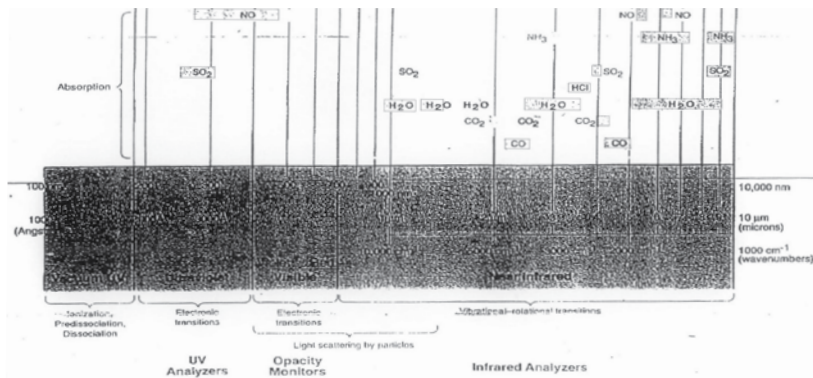
차량 배기구로부터 발생하는 CO, NOx는 적외선을 투사, 적외선 흡수량 변화를 측정하여 대상 가스 성분의 농도를 구하는 적외선 흡수법(Infrared absorption)을 채택하고 있다. 그림 11은 가스 성분별 흡수 영역대를 보여주고 있다. 그림의 우측편 적외선 영역대에서 CO는 타 가스와의 흡수 영역대와 중첩이 되지 않으므로 정확한 측정 결과를 얻을 수 있으나, NOx의 경우에는 수분(H<sub>2</sub>O) 또는 암모니아(NH<sub>3</sub>) 존재 환경에서 측정에 영향을 받아 오차가 많이 발생할 소지가 크다. 따라서 NOx 측정기 고려시에는 이 점을 충분히 감안하여야 하며, 자

외선 영역대에서는 NOx가 타 가스의 파장대와 덜 중첩되므로 자외선 흡수방식을 적용한 측정기를 검토하는 것이 바람직할 것이다.

터널 환경 측정기는 비용, 관리 측면을 고려하여 가시도와 CO(또는 NOx) 측정기가 하나로 구성되어 적용되고 있는데, 고장 등으로 유지보수가 필요할 경우에는 모든 항목이 측정불가하므로 운영 측면에서의 고려사항도 염두에 두어야 할 것이다.

### 풍향/풍속 측정기

풍향/풍속 측정방식에는 일반적으로 Pitot식, 열선식, 와류식, 초음파 방식 등이 소개되어 있으며, 터널 풍향/풍속측정은 타 방식보다는 고가이나 운영이 편리하고 비교적 신뢰성이 뛰어난 초음파 방식이 주로 적용되고 있다. 초음파에 의한 풍



[그림 11] 가스 성분별 흡수 영역대

향/풍속 측정 방식은 발신부(Sender unit)의 진동자에서 발생하는 초음파가 수신부(Receiver unit)에 전달되는 속도 차를 검출하여 풍향/풍속을 산출하게 된다. 국내에서는 1점식과 크로스 타입(Cross type)의 풍향/풍속 측정기가 많이 적용되고 있다(그림 12 참조).

### 바. 기타 터널 내 · 외부 측정기

터널 내부에서의 온 · 습도는 안전한 터널 운영과 효율적인 유지보수를 위한 중요한 파라미터이다. 특히 라이닝을 통한 침투수가 터널 표면에서 증발하거나, 여러 가지 경로를 통해 수분이 유입된다면 지 할 경우 내부 기후에 영향을 미치게 된다.

한국도로공사의 관련 기준에는 터널 외부용 풍향/풍속계, 기압계, 안개센서, 온 · 습도계를 설치토록 권고하고 있는데, 이는 환기적 측면에서 터널 외부에서 갱구부로 작용하는 자연풍의 정도에 따라 본선터널 환기설비의 풍량 및 풍향을 제어함으로써 에너지 절감과 터널 내부 안전에 기여할 수 있고, 방재 측면에서는 이러한 자연풍이 제연(Smoke control) 운전시 의도하지 못한 방향으로 불리하게 작용하여 인명피해가 발생할 수 있는 문제들을 고려하기 위함이다.

이 밖에 동절기 터널 갱구부 주변 응달지에 강우 또는 강설 후 기온 강하로 노면이 빙결될 경우의 사고 발생을 미연에 방지하기 위한 정보 및 대응체

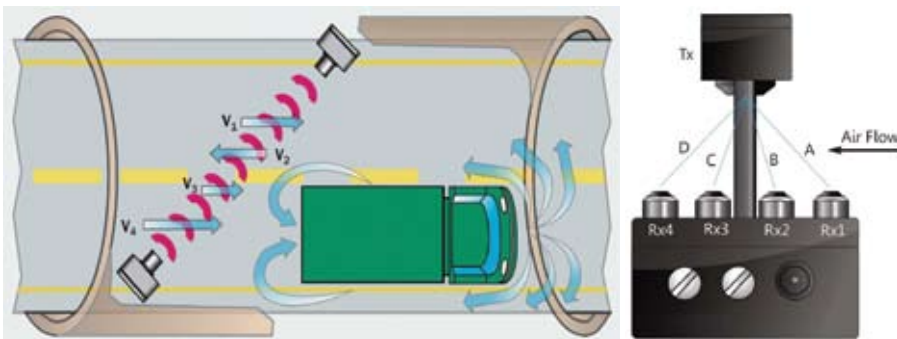
계 구성을 위해서는 온 · 습도, 강우 및 강설 측정기 등이 고려될 수 있을 것이다. 또한 터널 주변에 안개가 자주 발생하는 지역에서는 갱구부로 안개가 유입되어 운전자들의 시야 미확보로 사고가 발생할 수 있으므로 안개센서의 검토도 필요할 것이다.

### 환경측정시스템 구축 사례

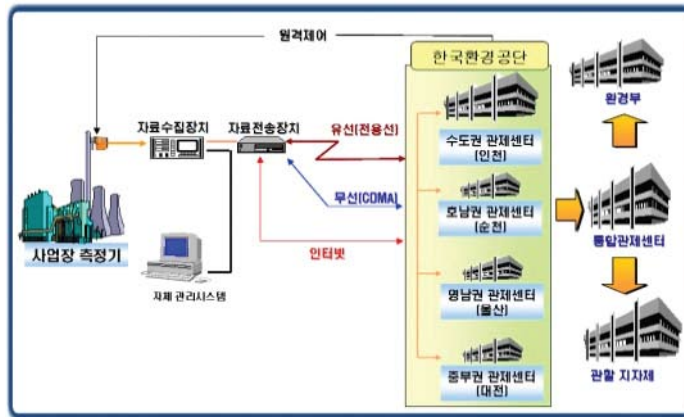
환경측정시스템은 터널을 비롯해 다양한 분야에 적용되어 운영중에 있으나, 과학적인 환경관리 기법이 적용되어 운영, 관리되고 있는 사례는 국내의 경우 대기오염측정망, 굴뚝원격감시체계, 실내공기질 자동측정망, 수질자동측정망 등이 있다. 이들 중 정부 10대 혁신브랜드로 선정되어 국외에 수출까지 논의된 바 있는 굴뚝원격감시체계는 사업장 굴뚝에서 배출되는 오염물질들을 자동으로 측정, 자료수집기에 실시간으로 저장 후 통신망을 통해 해당지역별 관제센터로 자료를 전송하는 체계로써 2002년부터 본격 운영해 오고 있다(그림 13 참조). 자료수집, 자료전송 뿐 아니라 배출허용기준 초과 우려시 또는 초과시 예 · 경보는 물론, 원격으로 측정기에 표준가스를 주입하여 정상작동 여부를 확인하는 최첨단 측정체계이다.

### 측정값의 정확성, 신뢰성 유지

국립환경과학원 고시 제 2010-49호 환경측정기기의 형식승인 · 정도검사 등에 관한 고시에서는



[그림 12] 크로스 타입(좌) 및 일점식(우) 풍향/풍속 측정기



[그림 13] 굴뚝원격감시체계(CleanSYS)

환경분야 측정기기의 형식승인·정도검사 방법과 기준 및 교정용품 검정의 내용·방법 및 유효기간, 정도검사 또는 검정결과의 기록방법 등에 관해 규정되어 있다. 전술한 바 있는 과학적 기법이 적용된 국내 자동측정망에 적용된 모든 측정기들은 이 고시에 따라 엄격히 관리되고 있다. 환경부에서는 환경오염도를 측정하여 그 결과를 행정목적에 사용하거나 제3자에게 제공하거나 외부에 알리기 위한 목적으로 사용하는 환경측정기기에 대해서만 형식승인대상으로 하고 있다.

그러나 터널 환경측정기의 경우 국내의 어떠한 관리규정도 포함되어 있지 않은 사각지대에 있는 실정으로, 국내 터널에 환경측정기가 설치된 이래 현재까지 형식승인은 물론 일체의 정도검사 기록이 전무할 정도이다. 전술한 바와 같이, 터널 환경측정시스템은 환기시스템 가동 여부와도 직결되어 있고 터널내 화재 발생여부 확인에 대한 보조설비로서의 역할도 가능하므로 정도(검·교정 포함) 관리는 필수적이다. 국제적 이슈인 탄소배출과 관련하여, 국토해양부에서는 도로 및 철도시설물에 대한 탄소배출량 산정 가이드라인(2011.8)을 작성하였는데 전력을 소비하여 운행되는 장비(터널 송풍기 등)들이 간접배출원으로 고려되므로 터널 환경측정시스템의 중요도는 더 커질 전망이다.

따라서, 현재까지 측정기의 사후관리를 일정 기준없이 공급업체 또는 관리주체에 의해 자체적으로 수행해 왔던 체계에서, 정확도와 신뢰도를 겸비한 판단 기준 도구로써 변화가 필요할 것으로 판단된다.

## 측정기 유지관리

“최신 기술 적용, 신뢰성 있는 정확한 측정값 제공, 고가의 외산 측정기 그리고 ...” 아무리 성능이 뛰어나고 고가의 장비라 하더라도 적절한 사후유지관리가 되지 않고 방치된다면 장비의 원래 목적을 상실하고 만다. 터널 환경측정기는 특정물질들에 대한 측정값 제공 목적에서 한발 더 나아가 운영비용 및 안전과도 밀접한 관련이 있는 장비이므로 유지보수의 필요성은 말할 나위 없다.

측정기의 유지관리에서 표 4와 같이 측정기별 유지관리 근거 자료를 준비하도록 추천하는데, 점검항목별 내용과 사유를 측정기 매뉴얼(Manual)을 참고하여 중요사항 위주로 기재한다.

다음으로 표 5와 같이 측정항목별 유지보수 점검표를 작성, 일/주/월/분기/반기/년의 점검주기별 점검항목, 점검내용, 실시방법을 표시하여 해당 주기에 지속적으로 점검하여야 할 것이다.



표 6은 연간 유지관리 계획서로써, 터널에 설치된 측정시스템의 일반현황과 유지관리방법 및 주기 그리고 검·교정 이력에 대한 체크 리스트를 포함하고 있다.

유지관리 관련하여 제시하는 본 양식들은 한국 환경공단에서 관리하고 있는 굴뚝원격감시체계에서 사용되고 있는 것으로, 자체적인 유지관리를 수행하고 있는 관리주체에서도 바로 활용가능하다.

### 맺음말

이상과 같이 터널 환경측정시스템 구성 요소, 측정기 종류 및 기본 원리, 측정기 유지관리 방안 등에 대해 살펴보았다. 국토해양부의 2010년 기준 도로터널 현황조사에 따르면 터널 환기설비가 설치된 터널(1 km 이상 연장 기준)은 편도 기준으로 약 250개 정도로 파악된다. 터널환기 분야에서 측정기는 단순히 대상 항목에 대한 측정 데이터 산출 기능에 국한된 것이 아니라, 터널 환기설비 가동에 대한 기준지표 역할, 화재 발생 여부에 대한 보조 판단 장치 및 터널 내 안전한 통행 환경(내부 풍속 10 m/s 이내 유지) 제공여부 확인 등 다양한 역할

〈표 4〉 가시도 측정기에 대한 유지관리 근거(예시)

점검항목(가시도)		점검내용	점검사유
대상	항목		
측정부	발광부	발광 광학렌즈 오염 여부	▶Sensor 뭉치의 고온과 Lamp의 발열로 인하여 렌즈 표면이 오염 될 소지가 있으며 오염시 Lamp 광학세기가 줄어들어 측정 Data에 영향을 줄 소지가 있음
본체	Power Pack	정상 동작 여부	▶전압의 Hunting 사항 점검
	REFLECTOR 부	FOCUS 상태 확인	▶렌즈의 초점이 정확해야 측정이 제대로 이루어지므로 점검 실시
	Analyzer 부	Status 상태	▶Status 신호의 오동작 발생 가능성 있음
교정	교정	Zero, Span 교정	▶출력 Data의 정확도 향상을 위하여 교정 실시

〈표 5〉 가시도 측정기에 대한 측정항목별 유지보수 점검표(예시)

#### 측정항목별 유지보수 점검표

■ 점검항목: 가시도(광투과법)

○ 점검(조정, 교정을 기록)  
□ 교환 또는 보충

점검항목		점검내용	점검주기						실시방법	비고
대상	항목		일	주	월	분기	반기	년		
측정부	발광부	점등유무			○				전압 확인 및 청소	
	Detector	각부 전압 상태			○				각부 전압 확인	
	Sensor Body	부식상태			○				육안 확인 및 청소	
	Lens	오염상태			○				육안 확인 및 청소	
	PCB	정상 동작 여부			○				육안 확인 및 청소	
본체	Air Purge Unit	이상음, 이상진동 여부			○				육안 확인 및 수리, 교체	
	Transmitter/Receiver Unit	정상동작여부			○				육안 확인 및 수리, 교체	
	Evaluation Unit	정상동작여부			○				육안 확인 및 수리	
	Power Pack	정상 동작 여부			○				Test Point 전압 Check	
	Main Board	정상 동작 여부			○				Test Point 전압 Check	
	Connector	단선여부			○				정위치 연결여부 및 Line Check	
교정	Zero 교정	Zero 교정		○					Zero 값 확인	
	Span 교정	Span 교정		○					Span 값 확인	

〈표 6〉 터널 환경측정시스템 연간 유지관리 계획서(예시)

### 연간 유지관리 계획서

○ 일반현황

구분	터널명	측정항목	측정기기			비고
			모델	측정방식	측정방법	
상행	OO터널	가시도		광투과법	현장직접취부	
		CO		적외선흡수법	현장직접취부	
		NOx		적외선흡수법	현장직접취부	
		풍속/풍향		초음파식	현장직접취부	
		온도		측온저항체	현장직접취부	
		기압		아네로이드	현장직접취부	

○ 유지관리방법 및 주기

터널	점검주기	일상점검	정기점검	월간점검	분기점검	반기점검	Overhaul	비고

○ 정도 및 검교정 계획 및 이력

터널	측정항목	정도검사일시	정도검사기관	정도검사결과	자체 상대 정확도 계획
OO터널	가시도			양호	법적점검기준에 따라 점검함
	CO			양호	
	NOx			양호	
	풍속/풍향			양호	
	온도			양호	
	기압			양호	

을 수행할 수 있는 중요한 장비로써 인식을 달리 해야 할 필요가 있다. 아울러 탄소배출량과 관련한 에너지 절감의 시대적 요구에도 부응하여야 하므로 이에 대한 재고가 절실한 시점에 도래하였다고 볼 수 있다.

무엇보다도 이러한 역할을 충분히 수행하기 위해서는 터널 환경측정시스템 관련한 정부 주도의 관리 규정이 마련되고 이에 근거하여 과학적인 기법을 활용한 관리 체계가 필요할 것이다. 다행스럽게도 이미 국내 환경 분야에서는 세계적 수준의 측정망 관리체계가 구축되어 있으므로 벤치마킹하여 적극 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 이러한 체계를 기반으로 환기설비 내구연한 증대, 환기설비 가동 관련한 에너지 절감, 화재 등 유사시 인명피해 최소화 등 환기 및 방재 측면의 목적 달성

에도 상당부분 기여할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. PIARC 보고서, Road Tunnels : Emissions, Ventilation & Environment, 1995
2. Verena Langner, et al., Climate in very long railway tunnels, AFTES-Tunnels et espace souterrain, No 220, p336~340, 2010
3. 한국도로공사, 고속도로 터널 환기시설 설계기준, 2002.8
4. 국립환경과학원 고시 제2010-49호, 환경측정 기기의 형식승인 · 정도검사 등에 관한 고시, 2010.12.28 환경환경공단, www.keco.or.kr

