일반기사 I

도로터널에서 차량에 의한 오염물질 처리시설 소개

유지오
신흥대학

서종원
신흥대학

장지돈
범창종합기술

1. 개요

산업과 생활수준의 향상에 따라서 도로나 철도 등의 기간산업에 대해 고속화 및 대용량화가 요구되고 있으며, 최근 급속한 인구증가에 따른 자연환경훼손 증가로 환경보호에 대한 관심이 증가되고 있다. 따라서 차량통행의 증가 및 물류비 증가와 균형적인 지역발전을 위한 대책으로 기존도로의 선형개량 , 확장공사 및 신설도로를 계획함에 있어서 가능한 한 환경파괴를 최소화할 수 있도록 하는 방안이 터널설계의 주요 고려 사항이 되고 있는 추세이다.

도로터널환기는 평상시에는 터널통과 차량에 의해서 배출되는 오염물질을 희석 · 배출하므로써 운전자의 안전운행조건을 확보하고 화재 시에는 신속한 배연을 통해 인명 및 재산의 피해를 최소화하는 것을 목표로 한다.

그러나 터널의 계획은 자연환경측면에서는 환경훼손을 최소화할 수 있는 방안에는 부합되나 대기환경측면에서는 차량으로 인한 오염물질 배출총량은 동일할지라도 터널내를 주행하는 차량에서 배출되는 오염공기가 터널출구를 통해 집중적으로 배출되므로서 국부적인 환경파괴의 원인이 되기도 한다. 따라서, 유럽, 일본등과 같은 선진국에서는 입자상물질(매연)에 대한 정화를 위해 전기집진기 또는 제진설비의 적용을 증가시키고 있는 추세이다.

반면 가스상물질(CO, NOx)에 정화시설에 대해서는 최근들어 적용을 위한 시도가 행해지고 있으며 시험설비를 통한 정화설비의 성능을 확인하고 있는 실정이다. 유럽에서는 1992년, 일본에서는 1996년 연구가 시작되어 상용화되어 유럽의 도로터널설계에 적용하고 있는 바, 향후 장대화되는 터널연장으로 인해 갱구부 주변대기 환경영향 감소를 위해 국내에서도 이러한 정화시설에 대한 설계가 검토가 필요할 것으로 예상되어 도로터널의 공기오염 관리현황과 배출되는 가스상 정화물질중 NOx 정화시설에 대한 설계사례를 소개하고자 한다.

2. 터널내 공기오염 관리현황

국내의 경우 터널의 공기오염을 관리 기준은 미국환경청(EPA), 미국연방고속도로관리국(FHWA), 국제상설도로협회(PIARC)의 기준과는 다소 차이가 있으나 PIARC기준을

근거로 작성된 한국도로공사의 터널환기시설 설계기준에 제시된 오염물질별 허용농도기준을 적용하고 있다.

도로터널의 경우 배출되는 오염물질의 농도가 교통량의 조건에 따라 다르며 차량의 통과속도에 의해 기류의 변화가 매우 유동적이기 때문에 일반 실내공간에서의 오염물질의 농도특성과는 큰 차이가 있다고 본다. 또한 지하상가, 대합실, 지하주차장 등과 같은 공간은 실내에 사람이 체류하는 시간이 긴 반면 도로터널의 경우는 1000~2000 m 터널을 기준으로 차량속도 100 km/h로 30초~1분내에 통과하는 특성을 고려할 때 실내공기오염 관리기준을 적용하는 것은 바람직하지 않다고 볼 수 있다.

Table 1. 교통상태에 따른 CO, NOx 및 매연투과계수의 권고치 (PIARC 95)

교통상태	CO		NOx	가시거리	
	연도			투과계수	투과율
	1995	2010			
	ppm	ppm	ppm	10^{-3} m^{-1}	%
50~100 km/h	100	70	25	5	60
매일혼잡	100	70	25	7	50
극도로 혼잡한 통행	150	100	25	9	40
터널유지보수	30	20	25	3	75
터널차단	250	200	25	12	30

Table 2. 차량속도별 매연의 허용기준표

설계속도	매연허용기준 (K_{lim}^{-1})				
	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
10 km/h			▲	●	
20 km/h			▲	●	
30 km/h			▲	●	
40 km/h		▲	●		
50 km/h		▲	●		
60 km/h	▲	●			
70 km/h	▲	●			
80 km/h	▲	●			

▲ : (2010) PIARC 권고치 ● : 현재 설계 기준값
▒ : PIARC 허용범위

현재 우리나라의 경우는 전 세계적으로 PIARC이 제시하고있는 권고치를 허용농도로 사용하여 운용 및 설계기준에 적용하고 있다. Table 1은 PIARC에서 제시한 교통상태에 따른 CO, NOx의 농도와 분진농도에 대한 투과계수의 권고치를 나타낸 것이고 Table 2에는 차량속도별 매연의 허용농도를 비교하였다.

2.1 주요 오염물질의 특성

우리나라는 현재 대기 및 실내공기오염이 매우 심각한 나라로 분류되고 있으며 대기오염의 악화는 실내공기의 환경에도 많은 영향을 주고 있다. 실제 대다수 사람이 하루중 약 90%의 시간을 실내공간에서 보내고 있으며, 그 공간이 직장 또는 작업현장임을 감안할 때 실내 공기오염에 대한 관심과 개선 노력은 매우 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 실내 공기오염을 평가하는데 많이 사용되는 오염물질은 NOx, CO_2, CO, TSP, PM_{10}등이 있으며 이 물질들은 실내공기오염의 지표로도 이용되고 있다.

가. 질소산화물(NOx)

질소산화물은 N_2O(Nitrous Oxide), NO(Nitric Oxide), NO_2(Nitrogen Dioxide), NO_3(Nitrogen Trioxide), N_2O_3(Nitrogen Sesquioxide), N_2O_4(Nitrogen Tetraoxide), N_2O_5(Nitrogen Pentoxide) 등의 형태가 있으며 보통 NOx라고 하는 것은 NO와 NO_2를 말하며 이들 성분이 공기중의 대부분을 차지하고 있다.

대기오염에서 NO와 NO_2는 저층 대기인 대류권에서 중요한 오염물질로서 미국의 LA에서 광화학 스모그가 발생한 이래 주목을 받게 되었다. NO_2는 탄화수소가 없는 깨끗한 대기 내에서 NO_2가 파장이 3000~4000Å인 자외선에 의해 NO와 산소원자로 분리되어 이 산소원자는 O_2와 결합하여 O_3가 형성된다. O_3는 다시 NO와 결합되어 NO_2와 산소원자를 형성하며 이러한 반응은 탄화수소가 있는 경우에 매우 빨리 일어나고 빛의 강도에 따라

오존의 발생량은 다르며 O_3의 농도가 0.1 ppm인 경우에 있어서 NO_2와 NO의 양은 약 10배이다. 질소산화물의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

NOx의 발생은 자동차 보급이 많이 된 선진국에서 자동차 배출가스와 그로 인한 광화학 스모그 현상에 기인한 것으로 선진국형 오염물질로 분류하기도 한다. 배출원을 사용목적에 따라 분야별로 구분하면 난방, 산업, 수송, 발전분야로 나눌 수 있다. 인위적인 발생원으로는 자동차와 같은 이동 발생원과 화석연료를 사용하는 발전소, 보일러, 소각로와 같은 고정 발생원이 있다. 자연적인 발생원은 토양과 수중 미생물의 작용, 번개 등을 들 수 있으며 성층권에서는 N_2O가 오존과 반응하여 NO를 생성하기도 한다.

NOx의 인체에 미치는 영향은 농도가 클 때 단시간 접촉되면 호흡이 빨라지는데 이것은 폐에 이상이 생겨 많은 양의 공기를 흡수시킬 수 없기 때문이다. 만약 낮은 농도에서 장시간 노출되는 경우에는 만성 폐질환을 가져올수 있다. 이와 같은 만성 폐질환은 49.9 ppb의 농도에서 나타나는 것으로 보고되고 있다. 실내공기 오염물질의 규제기준은 각 나라마다 차이가 있으며 우리나라는 NOx의 경우 일본처럼 일반환경기준(0.08 ppm)을 적용하거나 실내공기오염 권고기준을 채택하여 0.15 ppm을 권장하고 있다. Table 4는 질소산화물의 농도변화에 따른 인체의 영향을 나타낸다.

Table 3. 질소산화물의 물리적 특성

구 분	융점(℃)	비점(℃)	임계온도(℃)
N_2O	-90.86	-88.46	36.5
NO	-163.6	-151.8	-94
N_2O_3	-100.7	-40	-
$NO_2(N_2O_4)$	-11.2	21.15	158.2
N_2O_5	승화점	32.4	-

Table 4. NOx의 농도와 인체영향

농도(ppm)	인체에 미치는 영향
1~3	취기를 감지
13	눈, 코의 자극 및 중추신경계에 영향
50	기관지염 및 폐렴
100	인후자극 및 심한기침 유발
500	기관지 폐렴 및 급성 폐부종

나. 일산화탄소(CO)

일산화탄소의 발생원은 인위적 발생원과 자연적 발생원으로 나누어진다. 인위적 발생원으로는 수송, 폐기물 소각, 농업소각, 제철소 등과 같은 산업장이 있다. 일반적으로 고정 발생원의 연소관리기술이 발달된 선진국의 경우에는 차량과 같은 이동 발생원에서 배출되는 일산화탄소가 대기 및 실내공기오염의 주원인 중 하나로 보고되고 있다.

자연적 발생원으로는 화산폭발, 테르펜(Terpene)류의 산화, 클로로필(Chlorophyl)의 분해, 산불 및 해수 중에서 미생물의 작용 등이 있으며, 이들 이외에도 메탄의 광산화 및 이산화탄소의 광분해(Photolysis)에 의한 것도 상당량이 될 것으로 추정하고 있다. 전 지구상에서 인위적 발생원과 자연적 발생원에 의해 대기 중으로 방출되는 일산화탄소의 추정치는 Table 5와 같다.

한편, 우리나라에서 화석연료의 연소에 의해 배출되는 일산화탄소 중 수송분야가 차지하는 비중은 약 87%를 차지하는 것으로 보고되고 있다.

또한 일산화탄소는 물리 · 화학적 특징에 의해 다른 오염물질과는 대기 중에서의 거동이 다르게 나타난다. 즉, 물에 난용성이기 때문에 수용성 가스와는 달리 비에 의한 영향을 거의 받지 않으며 대기 중에서 이산화탄소로 산화되기 어렵다. 또한 대기 중에서 자외선을 흡수하거나 가시도(Visibility)를 저하시켜, 대기 중에서 다른 오염물질과 유해한 화학반응을 일으키지도 않는다. 일산화탄소는 다른 물질에 흡착현상도 나타나지 않는다. 예를 들면, 황산화물은 실내에서 벽표면에 흡착하여 그 농도가 급속히 감소하지만 일산화탄소는 이러한 경향을 보이지 않으며 이러한 성질들이 공기 중에서의 수명을 길게하는 요인이

Table 5. 지구규모의 CO 발생량

발 생 원	발생량 (10^6톤/년)
자동차(휘발유차)	197
(디젤차)	2
비행기	5
선박	18
철도	2
기타 이동차(건설기계, 트렉터 등)	26
석탄연소	4
공업(석유정제, 제철소 등)	41
쓰레기 소각	23
기타(농업소각 등)	41
인위적 발생원 소계	359
산불	11
해양생물	3~360
테르펜의 산화	60
클로로필렌의 분해	90
자연적 발생원 소계	164~521
합 계	523~880

Table 6. CO의 농도와 인체영향

농도(ppm)	인체에 미치는 영향
5	교차신경계의 반사작용 변화
30	시각 및 정신기능 장해
200	전두부 강도의 두통
500	심한 두통, 공포심, 시력장해
1,000	맥박의 증가, 경련 및 혼수상태
2,000	사망

되는 것으로 생각된다.

우리나라는 대기오염 측정망과 함께 대도시에서 자동차 배출가스 측정망을 설치, 운영하고 있으며 대도시의 일산화탄소 농도는 0.8~1.4 ppm으로 8시간 평균 환경기준인 9 ppm에는 상당히 미달하는 것으로 기록되고 있다. Table 6은 일산화탄소의 농도에 따른 인체의 영향이다.

다. 총 분진량(TSP) 및 미세분진(PM_{10})

총 먼지량은 공기중의 먼지입자의 총량으로 그 크기는 입자지름이 0.11~100 ㎛이며, 그 중에는 일반먼지, 불완전연소에 의한 휘발성 유기탄소, 그을음(Soot) 등이 포함되어 있다. 공기중에 부유하고 있는 먼지중 입자의 크기가 10 ㎛이상의 먼지입자들은 인체의 호흡기관을 통해 폐포에 도달되는 과정에서 상당수가 걸러지고 있으나 입자의 크기가 10 ㎛이하의 미세분진(PM_{10})들은 그대로 폐포에 유입되어 침착되는 경우가 많은 것으로 보고되고 있다. 따라서 공기중에 부유하고 있는 먼지를 제어할 경우 그 대상을 PM_{10}으로 하는 것이 공기질 관리 및 인체의 영향을 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 우리나라에서는 1996년부터 공기질 평가에 TSP의 적용대신 PM_{10}을 사용하고 있으며 미국, 호주, 유럽 및 일본과 같은 선진국의 경우는 더욱 깨끗한 공기질의 유지를 목적으로 PM_{10}의 사용 외에 $PM_{2.5}$까지 적용하고 있는 실정이다.

분진이 인체에 미치는 영향은 입자의 크기에 따라서 인체의 다른 부위에 축적된다. 10 ㎛이상의 크기를 갖는 대부분의 입자는 인체 내로 들어가기 전에 입이나 코 등에서 제거되나 10 ㎛이하의 크기를 갖는 입자, 즉 PM_{10}은 기관지를 통과하여 그 중의 10~60%정도가 인체에 영향을 줄 수 있는 폐에 침착 된다. 폐에 대한 침착정도는 3 ㎛크기를 갖는 입자가 20%인데 반하여 입자의 크기가 0.03 ㎛일 경우 60%로 최대치를 나타내며 이 보다 작은 입자로 갈수록 폐에서의 침착 정도는 감소하게 된다. PM_{10}의 농도가 150 ㎍/㎥이상일 때 인체에 미치는 영향은 기침, 만성 호흡기질환, 천식, 진폐증, 폐암 등이다.

3. NOx 가스 정화설비 설계사례

도로터널 가스정화시설은 인체에 작은 농도로 가장 피해를 크게 입히는 NOx에 대해 정화처리가 가능한 시설

을 중심으로 개발배경과 시험운영중인 터널의 설계현황을 소개하고자 한다.

3.1 시험설비 현황

가. 노르웨이 Festings 터널

(1) 개 요

본터널 시험설비는 1992년 노르웨이 ABB ALSTOM POWER A/S와 노르웨이 도로공단이 가스정화에 대해 연구를 시작하여, 노르웨이 Oslo의 Festings 터널에 가스정화 시험설비 설치(Table 7참조)하였으며 3년 동안 24,000시간이상 시험설비를 가동하였으며, NO_2정화시스템의 장시간 성능저하를 방지하기 위해서 특별한 형식의 활성탄 촉매를 사용하였다

2을음(Soot)와 먼지(Dust)로 인해 장시간 사용시 석탄

Table 7. 가스 정화 대상물질 및 효율

구 분	세 부 내 용			
처리용량/규모	10,000m³/h Scale 1 : 360			
가스정화 대상물질	분진, NO_2, VOC (Volatile Organic Carbon)			
설비별 정화물질	□전기집진기: Soot 및 Dust (분진) □Carbon filter: VOC(방향족 탄화수소 화합물) □필터 촉매작용 : NO_2 및 O_3			
VOC 물질	C_2에서 C_8 분자구조인 Ethane, Ethylene, Acetylene, Propane, Propolylene, I-Buthane, N-Buthane, 2-Methy1-Buthane, Buthylene, Hexanes, Benzene, Toluene, Ethy1 benzene, Xylenes			
처리후 발생물질	N_2, NO, CO			
설비 효율	Soot 및 Dust	NO_2	VOC	O_3
	90%	85~90%	-	-

필터(Carbon filter) 막힘 발생이 발생되었고 가스 정화 시스템 전방에 효과적인 분진제거가 필요하게 되었으며 1998년 이르러 가스정화시스템을 상용화하게 되었다

(3) 시스템 구성

분진이 촉매반응 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 정화기 상류에 전기집진기를 필수적으로 설치하였고 촉매제로 채워진 베드(NO_2 filter) 밑으로 오염된공기가 들어와 분산되어 통과하는 구조로 되어 있으며 전동댐퍼를 설치하였다.

정화기 전후에 NO_2측정장치를 설치하여 시스템의 효율을 모니터하며 축류팬, 댐퍼, 측정장치는 PLC에 의해 자동적으로 제어된다.

(4) 시스템 성능

오염된 공기중 NO_2만을 처리하고 NO는 처리할 수 없으며 NO는 O_3에 의해 NO_2로 산화될 수 있으나 장대터널의 경우는 터널내에 O_3가 존재하지 않으나 도심터널의 경우 NO_2만을 정화하는 것이 충분한 것인지에 대해 논쟁의 여지가 발생될 수 있다

NOx중 NO_2의 구성비는 체적기준으로 7~10%범위에 있으며, 터널제반조건에 (교통량, 차종구성비, 종단경사, 터널연장 등) 의존하지만 통상적인 터널내 농도는 NO_2는 200~1000ppb, NO는 3~10ppm정도 였으며 ALSTOM 촉매처리장치를 통과한 공기는 NO_2의 경우 40ppb정도로 줄어드나 NO는 그대로 3~10ppm을 유지하였으며 약 16,000시간 가동 후 필터의 압력상승 때문에 NO_2필터 청

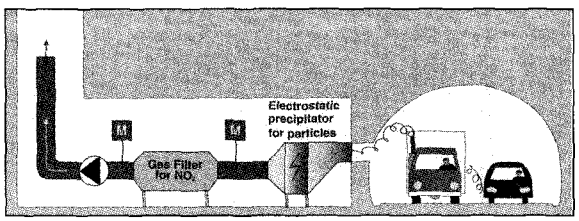

그림 1. 가스정화설비 개요도(Festings 터널)

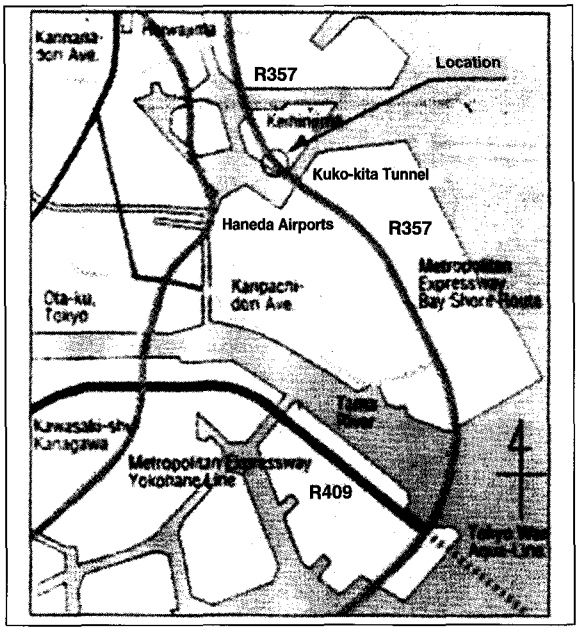

그림 2. 설치터널 현황

Table 8. 가스 정화 대상물질 및 효율

구 분	세 부 내 용		
처리용량	160,000 Nm^3/h		
환기소 크기	12.8m(폭) ×40.0m(길이) ×6.8m(높이)		
전기용량	500KVA		
가스정화 대상물질	NOx, NO_2, SPM		
설비별 정화물질	▫전기집진기 : Soot 및 Dust (분진) ▫Absorbing unit : NO_2		
처리후 발생물질	N_2, H_2O		
목표 효율	NOx	NO_2	SPM
	80% 이상	80% 이상	80% 이상

Table 9. 정화 대상물질 및 효율(Kuko-kita터널)

처리대상 물질	NOx	NO_2	SO_2	HC	CO
정화효율 (%)	83~97	94~99	99	7~27	6~18

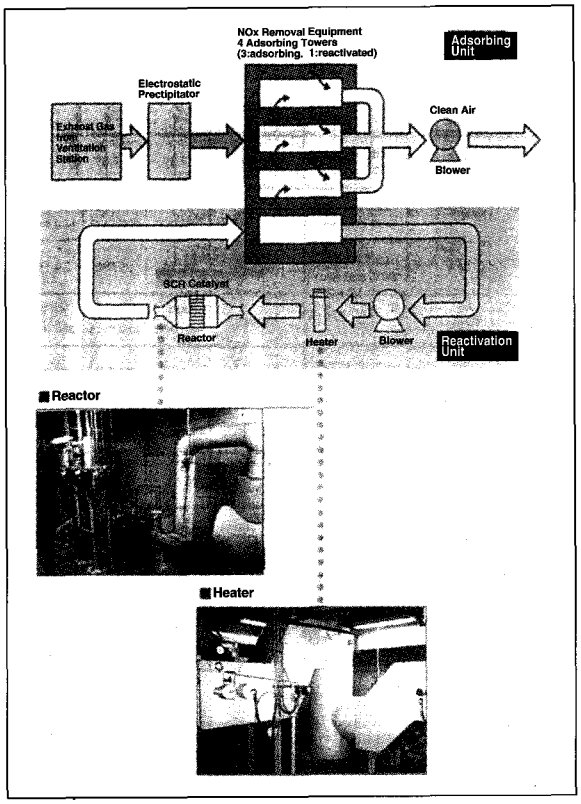

그림 3. 시스템 구성

소가 필요하다.

터널밖 대기와 섞이게 되면 NO_2는 60ppb, NO는 80ppb, 산화물(주로O_3)은 20~30ppb가 되고 터널외부 대기와 혼합될 때 NO_2의 증가율은 NO와 대기중 O_3의 구성비에 따라 변하게 된다.

도시 대기환경에 있어서는 정화처리를 설치한 경우나 미 설치한 경우나 일반적으로 큰차이는 나지 않으며, 국부적인 터널출구 또는 배기구 부근에서는 다를 수 있다.

나. 일본 Kuko-kita 터널

(1) 개 요

1991년부터 1994년까지 소규모 현장 시험설비를 통

하여 NOx 정화기술의 기본적인 효율을 정립하였고, 안전성, 내구연한, 공간 · 에너지 소모 등에 관한 문제를 검토하기 위하여 대형 시험설비를 1996년에 제작하여 Metropolitan Express Bay Shore Route Kuko-kita 터널 Keihinjima 환기소에 시험설비 설치하였다.(그림 2, Table 8 참조)

(2) 시스템 구성

분진이 촉매반응 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 정화기 상류에 전기집진기를 필수적으로 설치하였으며, Absorbing Tower 4개중 3개는 NOx를 흡수하고 1개는 흡수된 NOx를 SCR 촉매장치와 반응시켜 N_2와 H_2O로 분해시키는 시스템으로 구성되어져있다.(그림 3)

(3) 시스템 성능

정화설비는 1단계 1997. 2 ~ 1997. 8와 2단계 1998. 2 ~ 1997. 9로 시스템성능을 시험하였으며 시스템의 처리대상물질별 평균효율은 Table 9와 같다.

3.2 상용설비 현황

가. 개 요

노르웨이 Laerdal 터널은 2차선 대면교통이며 내공단면적은 46.9 m^2이고 설계교통량은 1,000대/일(최대400대/시)이며 터널연장은 24.5 km 세계 최장 도로터널로 1995.3.15일 착공하여 2000.11.27일 준공하였으며 Aurland쪽 갱구로부터 18 km지점에 배기갱이 설치되어 있으며 10 km지점에 가스정화설비를 계획하였다.(그림 4, 그림 5)

가스정화설비는 전기집진기와 NO_2가스 정화설비로 구성되어있고 전기집진기 집진효율은 90 ~ 95%이며 유독가스 처리설비는 NO_2 는 85 ~ 90% , VOC (불연소된 탄산가스)는 60-75% 정화하고 O_3는 100% 제거할 수 있다.

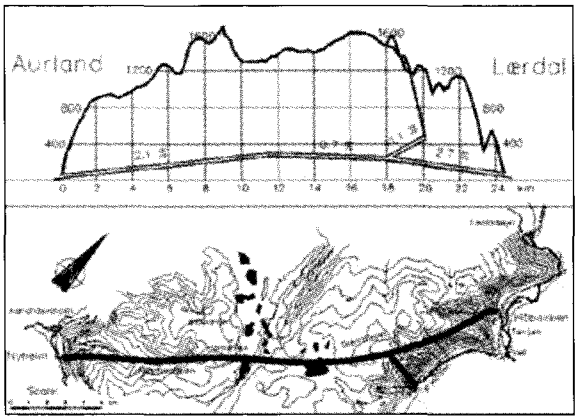

그림 4. Laerdal 터널 종단 및 평면도

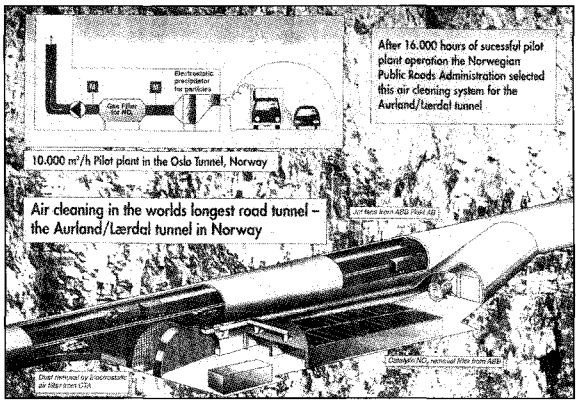

그림 5. 정화설비 개요도

나. 터널 설비현황

- 배기팬 : 형식 Howden D1400-1259-422
  - 전력 2×502kW = 1004kW
  - 내경 2,985mm
  - 풍량 2대×240m^3/s = 480m^3/s
  - 정압 1300Pa
- 젯트팬 : 형식 ABB FREB-160-2-65-59
  - 전력 30×36kW = 1080kW
  - 회전속도 965rpm
  - 추력 1772N
- 공기정화시스템 : Dust, Soot, NO_2

- 물리적 필터 필터면적 48m²
- 전기집진기 필터면적 48m²
  용량 180m³/s
- NO_2 필터 필터면적 430m²

4. 결언

도로터널의 환기에 있어 터널의 장대화 및 환경규제의 강화로 환기량의 증가가 예상되며, 이로 인해 환기시설용량이 증대하게 될 것으로 판단된다. 따라서 환기시설용량의 증대에 대한 해결책 및 터널내 오염물질의 제거를 위한 보다 적극적인 수단의 필요성이 강조되고 있는 실정이다.

이에 본 고에서 현재까지는 실험단계 및 상용화 초기단계에 있는 가스 정화설비에 대해서 소개한 바, 이와 관련한 기술은 외국에서도 최신기법으로 아직까지 외국에 적용사례가 많지 않은 실정이다.

따라서, 최근 SOC사업과 턴키사업의 활성화로 신기술, 신공법의 적용이 활발해면서 터널환기설계의 다양화가 모색되고 있는 시점에서 가스정화설비의 도입은 보다 신중한 검토와 연구 및 자료의 정립을 통해서 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. LAERDAL 터널홍보 자료집, 노르웨이
2. Pilot plant for NOx cleaning technology for road tunnel exhaust gas, BHR Group Vehicle Tunnels
3. ALSTOM NOx gas cleaning system

한국터널공학회
2003 학술발표회 논문투고요청

친애하는 회원 여러분! 우리 학회발전을 위해 노력하여 주시는데 감사드립니다. 아시는 바와 같이 우리 학회의 2003년 총회 및 정기학술발표회를 5월 29일에 개최합니다. 회원 여러분들의 많은 논문 투고를 다시 한번 부탁드립니다.

▶**일시** : 2003년 5월 29일 (목) 09:00 ~18:00
▶**장소** : 한국과학기술회관 대강당(역삼역소재)
▶**주제** : 제한없음
▶**초록 마감일** : 2003년 3월 31일
▶**논문 마감일** : 2003년 4월 31일
▶**원고작성형식** : 학회 홈페이지(www.tunnel.or.kr)
▶**문의처** : 한국터널공학회(02-2203-3442)
학술담당이사(김승렬:02-6006-4100)
학술담당간사(유충식:031-290-7518)

KTA (사)한국터널공학회
Korean Tunnelling Association