

도로터널의 환기

Road tunnel ventilation system design

조 용 철

Y. C. Cho

인하대학교 공과대학 명예교수



- 1928년생
- 도로터널의 환기계산 및 설계에 관심을 가지고 있다.

유 지 오

J. O. Yoo

신흥전문대학 건축설비과



- 1961년생
- 유동층 열전달 및 터널, 지하철 환기, 급조설비에 관심을 가지고 있다.

남 창 호

C. H. Nam

(주)범창종합기술



- 1959년생
- 건축설비 및 터널환기에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

산업사회의 급속한 발전과 더불어 도로건설의 수요가 크게 늘어나고 있다. 국토의 3분의 2가 산악지대로 형성되어 있고, 또, 오늘날 건설되는 도로(고속화)의 특성상 노선의 직선화가 불가피하기 때문에 터널의 건설은 필연적으로 많아질 수 밖에 없다. 현재 건설중에 있는 수도권 순환 고속도로만 하더라도 6개의 도로터널이 건설될 예정인 것으로 알려져 있다.

도로터널은 통행하는 차량의 배기가스로 인하여 공기가 오염되기 때문에 어떠한 수단으로든지

환기를 하지 않으면 안된다. 환기를 함으로써 위생적으로나 시각적으로 안전하고 쾌적한 통행이 보장되어야 할 뿐 아니라 터널주위 환경에 대한 환경규제도 고려하여야 한다. 환기방식은 자연환기와 기계환기로 대별되며 터널길이가 짧고 주행하는 차량에 의한 환기력만으로 환기가 가능할 때는 자연환기로도 무방하지만 그렇지 못할 경우에는 기계환기에 의존할 수 밖에 없다. 기계환기는 터널 자체의 구조적 조건과 터널이 놓여있는 자연조건 그리고 교통조건에 따라 환기방식이 달라진다.

따라서 기계환기를 함에 있어서는 터널의 입지

조건은 물론 기후·환경에 대한 조사와 함께 차량 수 및 차종의 구성등 교통류에 대한 면밀한 사전 조사가 전제되어야 한다. 이러한 조사자료를 바탕으로 기능적으로 우월하고 유지·관리가 용이할 뿐 아니라 무엇보다도 경제성이 뛰어난 설계가 이루어지도록 검토를 거듭하여 최종안을 결정하여야 한다. 또한, 교통상태의 변화에 대응할 수 있는 환기제어가 가능하고 아울러 화재 등 비상사태에 대해서도 능률적으로 대처할 수 있도록 배려되어야 한다.

선진 유럽국가에서는 자체적으로 설계기술의 개발에 주력하는 한편 국제상설도로회의(PIARC : Permanent International Association of Road Congress)를 통하여 설계기준을 표준화하는 등 설계수준을 향상시키기 위한 협력체제를 유지해 오고 있다.^{1,2,3,4)} 한편, 일본에서도 도로협회, 고속도로공단 등^{5,6)}이 주축이 되어 개발에 힘을 기울여 괄목할 만한 성과를 얻고 있으며, 특히 최근 동경만 횡단도로터널⁷⁾의 환기설계에 있어 새로운 환기기법을 도입하여 관심을 끌고 있다.

그러나 우리나라는 설계경험이 일천하고 연구가 체계적으로 이루어지지 못한 관계로 아직은 선진국의 경험과 설계기준에 의존하여 설계할 수밖에 없는 실정이다. 앞으로 이에 대한 연구의 활성화가 절실히 요청된다 할 것이다.

이러한 시점에 즈음하여 본 해설자는 도로터널의 환기계획에서부터 설계에 이르는 과정에서 요구되는 기본지식과 설계기법에 대한 기초사항을 해설하므로써 이 분야에 대한 관심을 제고시키고 연구의 활성화를 기할 수 있는 계기로 삼고자 한다. 본 해설은 앞으로 수회에 걸쳐 전개될 것으로 예상되며 환기설계를 위한 조사 계획, 환기량, 환기방식과 환기계산, 환기설비, 환경보전, 환기 제어, 비상시 운용등의 내용을 기술하고 마지막으로 터널환기에 대한 최근의 연구동향에 대하여 기술하고자 한다.

2. 조사·계획

2.1 조 사

터널 환기계획은 교통, 기상, 입지, 환경 등의

조건에 따라 그 특성을 달리하므로 이들에 대한 조사를 통하여 합리적이고 경제적인 계획을 수립하여야 한다.

(1) 교통조사

교통조사는 소요환기량과 환기력의 산정에는 물론 유지동력비의 예측이나 환경에 대한 평가를 함에 있어서 기초자료로 사용한다. 터널의 환기계획을 하기 위하여 필요한 교통량은 해당 터널의 교통량을 대상으로 하는 경우와 미래의 목표년도에 대한 교통량을 추정하여 이를 대상으로 하는 경우가 있는데 현재 우리나라에 새로 설계되는 터널은 20년후를 목표년도로 한 추정교통량을 설계시 교통량으로 하고 있다. 교통량에 대한 조사는 차량의 대수 뿐만 아니라^{8,9)} 차종의 구성비, 시간대에 따른 교통량의 변화, 요일별·계절별 변화, 주행속도 등을 함께 조사할 필요가 있다.

배기가스량을 산정하기 위해서는 차종의 분류를 상세히 하는 것이 바람직하며 통상 차종까지를 포함한 교통량의 추정이 어려운 경우에는 디젤차와 가솔린차만으로 구분하고 있다. 이는 디젤차가 환기량에 큰 영향을 미치는 매연을 다량으로 발생하는데 반하여, 가솔린차는 주로 일산화탄소를 발생하는 등 배기가스의 조성이 크게 다르기 때문이다.^{10,11)} 현재 추정교통량은 차종별로 구분하고 있으며, 이를 디젤차와 가솔린차 및 대형차와 소형차로 분류하여 환기계산을 위한 기초자료로 하고 있다. 최근의 조사에 따르면 대형차의 100%가 디젤차이고 소형차의 약 10% 정도가 디젤차인 것으로 나타나 있다. 배기가스의량은 주행속도에 따라서도 다르기 때문에 이를 추정하거나 실측하는 일이 필요하다.¹²⁾

(2) 기상조사

기상조사는 자연환기력의 계산 및 터널 갱구 또는 환기탑으로 부터의 배기가스의 확산으로 인한 주변환경에 대한 영향 등을 예측하기 위하여 필요하다. 자연환기력은 터널의 양갱구간 또는 갱구와 수직갱구사이의 압력차로서 자연환기의 원동력이 된다. 조사는 일반적으로 풍향, 풍속, 기온, 습도, 대기의 안정성 등에 대하여 이루어지고 관측기간은 일년 이상 관측하는 것이 바람직

하나, 각 계절을 대표할 수 있는 시기에 적어도 일주일정도 실시할 필요가 있다.

(3) 입지조건 및 환경에 대한 조사

터널을 계획하고자 하는 곳의 지형, 지물, 지질 및 지하 매설물 등에 관한 조사를 한다. 이들 조사는 환기용 수직갱이나 사갱의 위치선정과 환기방식의 선정, 환기소의 위치, 터널의 구조 또는 환기덕트 단면의 구조에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요하다. 아울러 환기탑 또는 갱구로 배출되는 배기가스와 소음에 대한 대책을 세우기 위하여 환경에 대한 조사가 수반되어야 한다. 환기탑으로부터 가스의 확산은 탑의 높이, 배출속도, 기상조건 등에 따라 다르므로 환경평가에 대처하기 위한 광범위한 조사가 필요하다. 환기기 소음의 영향은 환기탑의 높이, 환기소의 구조 및 급배기구의 방향 등에 따라 다르므로 주변 여건에 대한 충분한 조사가 이루어져야 한다.

(4) 관련법규에 대한 검토

터널건설과 관련이 있는 법규에 대한 검토가 필요하며 판리법으로는 도로법, 소방법, 대기오염 방지법, 자연환경 보호법, 문화재 보호법 등을 들 수 있다.

2.2 계 획

터널 환기계획은 터널 본체의 구조, 터널 내의 환경 뿐 아니라 도로 건설 전체계획의 일환으로서 주변여건 등을 감안하여 합리적이고 경제적인 관점에서 추진하여야 한다.

2.2.1 환기계획의 수순

(1) 터널 루트의 설정

터널 루트는 일반적으로 지형, 지물, 지질등을 고려하여 결정하나, 터널이 장대할 경우에는 수직갱 또는 사갱의 선정, 환기규모 등이 루트선정에 있어 중요한 항목으로 작용한다.

(2) 환기설계에 필요한 자료의 수집

환기설계에 필요한 자료로서 교통, 기상, 지형·지물, 환경등에 관한 자료수집과 관련법규에 대한 검토가 필요하다.

(3) 소요환기량의 산정

터널의 교통량과 선형 등을 기본으로하여 환기량을 산정한다. 특히 환기량은 환기시설의 규모

와 환기방식의 선정과도 밀접한 관계가 있으므로 다각적으로 검토하여 신빙성이 있는 값을 산정하도록 해야한다.

(4) 환기기본계획(환기방식의 선정)

터널의 연장, 소요환기량 등과 그밖에 관련자료를 토대로, 환기방식에 대한 기본계획을 수립한다. 계획을 수립함에 있어서는 가능한 모든 환기방식을 상정하여, 이들에 대한 비교·검토를 한 후에 최종안을 책정한다.

(5) 단면계획 및 풍압계산

덕트 등의 단면계획 및 풍압계산은 기본계획을 수립하는 단계에서 개략적인 검토를 하나, 결정안에 대하여 다음 항목과의 관련성을 고려하여 보다 상세한 검토를 시도한다.

(6) 설계 제원의 결정

덕트구조의 설계, 환기기의 사양과 배치 및 환기소의 계획과 설계를 한다. 아울러 운전, 감시, 제어에 관한 설비의 설계를 함께 하도록 한다.

(7) 환기기 등의 제작

설계사양을 만족할 수 있는 환기기, 덕트 등의 제작·시공을 한다.

(8) 운전조정

모든 기기의 설치가 완료된 단계에서 각 설비가 본연의 기능을 다 하고 있는가를 검토하고, 필요에 따라 조정을 한다. 이와 같은 조정은 실제로 시설을 가동한 후에도 다시 실시하여 경우에 따라 재조정을 한다.

2.2.2 환기방식

터널내의 주행환경 및 작업환경 또는 외부환

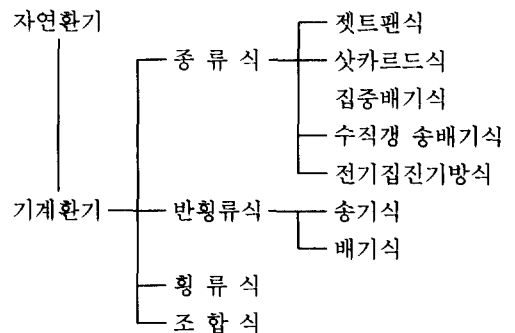


그림 1 터널환기방식의 분류

표 1 환기방식의 특징(일방향 터널)

환기방식	종 류 식					반 환 류 식		환 류 식	
기본적 특징	터널내 종방향의 기류가 발생하며, 교통환기력을 유효하게 이용할 수가 있다. 터널내 덕트는 필요하지 않다.					터널에 평행하게 설치된 덕트에 의해 송기 또는 배기되고 차도내 종방향의 흐름이 발생한다.		터널 덕트에 의하여 송기와 배기가 동시에 이루어지기 때문에 횡방향의 흐름이 발생하고 차도를 흐르는 풍량은 비교적 작다.	
대표적 형식	젯팬식	사카르트식	집중배기방식	수직강송배기방식	전기집진기식	송기반환류식	배기반환류식		
개 요	젯팬 및 교통환기력	송기노즐의 분류에 의한 송압 및 교통환기력	갱구로부터 흡입되는 풍량이 있을. 교통환기력이 저함으로 되는 구간 존재	송기노즐의 송압력 및 교통환기력에 의한	송기노즐의 송압력 및 교통환기력, 집진에 의한 오염물질 처리효과	터널내 송기덕트에 의해서 신선공기가 공급되고 오염물질이 희석됨	터널내 배기덕트에 의해 오염물질이 배기되고 양극구를 통해서 신선공기가 공급됨		
개 략 도	환기계통도								
	차도 내압								
	차도내 풍속								
	농도분포								
적 용 연 장	약 2,500m	약 2,500m	약 3,500m	환기상 제한 없음 (송기공이 필요함)	약 4,500m	약 3,000	약 3,000	연장상한은 없음	
차도내 풍속	역풍상태에서 한계속도는 12m/s 이하							덕트제의 분할이 가능하며, 일반적으로 차도내 풍속은 교통환기력에 의한다.	
	경계속도는 6m/s	젯팬과 병용하는 경우 약 6m/s	젯팬과 병용하는 경우 약 6m/s	약 6m/s 이하	약 6m/s 이하	중성점이 터널의 중앙에 있는 상태에서는 8m/s를 유지하고 국부적인 한계 풍속은 12m/s이하로 한다.			
구 조	천장에 젯팬 설치공간 필요	젯팬을 병용하지 않는 경우에는 천장공간 불필요			덕트공간이 필요		송배기덕트공간이 동시에 있어야 하므로 내공단면적이 가장 큼		
유 지 관 리	설비동력	차도공간에 있어서 환기를 위한 에너지 효율은 타방식에 비하여 불리함			걸보기 환기량이 저감되어 비교적 좋음		배기 반환류식에 비하여 동력비가 저렴함	송기 반환류식에 비해서 동력비가 큼	반환류식에 비해서 고가임
	제 어 성	풍량단계와 가동팬의 수는 비례하지 않음		풍량단계와 가동팬의 수는 비례하지 않음	풍량단계와 가동팬의 수는 비례하지 않음		교통량의 변동에 비례해서 제어됨		
	기 타	정비시 터널내 차도공간에서 작업이 진행됨	갱구부근의 환기소에 팬을 설치하기 때문에 용이함	환기소에 팬을 설치하기 때문에 정비가 용이		환기설비 전체의 유지관리작업량이 종류식에서 보다 증가함			
오염물질의 배출	송구측 갱구로 전량 배출		일부 또는 전량이 배기됨으로 배출, 갱구로의 배출제어가 가능	배기 및 송구측 갱구로 배출	송구측 갱구로 배출, 집진된 오염물질의 처리	갱구에서 오염공기를 배출하지 않고 배기탈을 통해서 배출함	배기탈을 통해서 배출되나 일부는 터널송구로 배출됨		
화재시 배연	송구측 갱구로의 배연		일정유를 통해서 일부 또는 전량을 배연	송구측 갱구를 향한 배연으로서 운영할 수 있음		화재시에는 기능 정지	환기기의 조합에 의해서 터널구간의 배기와 송기가 자유로우므로 화재대응력이 가장 우수하다.		
자연풍의 영향	자연풍 및 피스본작용에 의한 효과를 기대할 경우에는 이들의 영향을 정확히 평가할 필요가 있음					자연풍의 영향을 비교적 받지 않음			
설치의 곤란성	덕트를 필요로 하지 않기 때문에 터널의 개통후에도 환기설비의 추가 설치가능. 단 집진기설은 제외					차도공간과는 별도의 덕트를 필요로 하기 때문에 환기설비의 증설변경은 곤란하다.			
설 치 비	환기덕트는 차도공간 자체가 되기 때문에 다른 방식에 비하여 경제성이 좋음					종류식보다 고가임			
기 타	환기덕트도 차도공간 자체를 사용하기 때문에 압력손실이 적다. 전기집진기와 병용하여 적용연장을 늘릴 수 있다. 차도 또는 차도근방에 젯팬이 설치되므로 소음에 대한 고려가 있어야 한다. 립진 정화된 공기를 3회 이상으로 하는 경우에는 주의를 요함.					차량의 피스본작용을 저해하기 때문에 에너지효율면에서 종류식보다 떨어진다.		중성점에서 오염물질의 농도는 이론적으로 무한대가 된다.	종합적으로 볼 때 가장 신뢰성있는 환기가 가능하다.

경에 미치는 영향 등을 고려하여 여러 가지 환기방식이 입안·채용되어오고 있다. 현재까지 주로 계획·채용된 환기방식을 분류하면 그림 1과 같다.^{13, 14)}

터널의 환기방식은 목적에 부응할 수 있는 확실한 방식을 선정하여야 한다. 일반적으로 종류식 환기방식은 주행하는 차량에 의한 교통환기력과 제트팬 또는 송기노즐의 분류작용으로 터널내에 송압력을 발생시켜 신선공기를 도입하여 오염물질을 희석 환기하는 방식으로, 차량의 주행에너지를 효율적으로 이용할 수 있다는 점에서 타방식보다 에너지효율면에서 우수하나, 오염물질의 전량이 터널출구를 통하여 배출되므로 주위환경에 미치는 영향을 고려해야 한다.

반횡류식은 터널내부에 송기 또는 배기덕트를 설치하여 신선공기를 송기하거나 오염공기를 배기하는 방식이며, 횡류식은 송·배기덕트를 각각 따로 설치하여 신선공기와 오염공기를 동시에 송배기하는 방식으로 환기효과가 가장 확실한 방식이라 할 수 있으나, 터널내공단면이 확대되고 덕트의 설치비가 추가되므로 많은 경비가 소요되는 것이 단점이다.

조합식은 터널의 연장이 장대하거나, 환기량이 과다하여 하나의 환기방식만으로 환기가 어려울 때 서로 다른 복수의 환기방식을 조합하여 환기하는 복합적 환기시스템을 말한다. 이러한 과정에서 전기집진기를 도입하는 경우가 있는데 전기집진기는 매연만을 처리하므로 CO에 대한 검토가 별도로 이루어져야 한다.

표 1은 각종 환기방식의 특징을 나타낸 것이다.

3. 환기량

환기량은 터널 내를 주행하는 차량의 안전성, 쾌적성 및 유지관리작업의 안전성을 저해하는 유해물질의 농도를 설계농도(허용농도)이하로 희석하는데 필요한 신선공기의 양을 말한다. 현재 우리나라에서는 환기량 산정방법으로 일본에서 통용되는 방식과 PIARC방식을 공용하여 왔으나 근래 PIARC방식을 대상으로 하여 우리의 실정

에 맞는 설계기준을 설정하려는 작업이 진행되고 있다.

3.1 일본방식에 의한 환기량 계산

3.1.1 환기 대상물질

자동차 배기가스에 의한 오염물질의 종류는 사용하는 연료에 따라 달라진다. 그리고 그 배출량은 엔진의 종류, 형식, 정비의 정도, 부하상태 및 운전상태 등 각종 요인에 따라 다르다. 자동차 연료로는 가솔린, 액화석유가스, 경유 등이 사용되고 있다. 이밖에 메타놀, 천연가스, 수소가스등이 있으나 메타놀과 천연가스는 극히 일부에서 사용되고 있을 뿐이고 수소가스는 아직 연구단계에 머물러 있다. 전기 3종의 연료 가운데 주로 사용되고 있는 것은 가솔린과 경유이기 때문에 환기 대상물질은 이 두 연료사용으로 인한 배출가스를 생각하면 된다.

자동차의 배기가스 중에는 탄화수소의 연소생성물인 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)이 주성분으로 포함되어 있고 그밖에 복잡한 연소과정에서의 중간생성물, 연료에 포함된 첨가물이나 불순물의 연소생성물, 미연소 성분 및 고온·고압하에서 발생하는 반응생성물 등 다양한 성분이 포함되어 있다. 이들 가운데 유해성분으로서 고려하여야 할 것은 불완전 연소에 기인한 일산화탄소(CO), 매연(soot), 탄화수소(HC), 질소와 산소가 반응하여 생기는 질소산화물(NO_x: NO, NO₂), 그리고 첨가물이나 불순물에 의한 생성물질로서 유리납(Pb)과 황산화물 등을 들 수 있다.

이들 유해성분 가운데 터널환기에 있어서 배출량과 이들이 미치는 영향과의 관련성을 고려할 때 문제가 되는 것은 일산화탄소, 질소산화물 그리고 매연이라 할 수 있다. 조사에 따르면 이들 대표적 오염물질의 농도는 매연투과율 75% (100m당)정도에서 일산화탄소의 농도는 최대 15ppm, 질소산화물의 농도는 1.5ppm 정도로서 질소산화물의 농도는 일산화탄소의 1/10정도에 불과하다. 결론적으로 터널환기에 필요한 환기량은 생리적으로 영향을 미치는 일산화탄소와 시각에 장애를 주는 매연에 대한 환기량을 각각 구하여 큰 쪽의 값을 택하는 것을 원칙으로 한다.

표 2 환기량계산에 사용하는 유해성분의 배출량

유해성분	차 종	배출량 또는 매연농도		비 고
		평균 값	표준 편 차	
일산화탄소	가솔린차	7 l / km · 대	고려하지 않음	지체시의 배출량은 15 l / km · 대 정도
	디젤차			
매 연	가솔린차	0.05	0	매연농도 1m당의 빛의 투과율(α)로 다음식으로 구한다. $\alpha = \frac{-1}{1(m)} \log \frac{\tau}{100}$
	디젤차	0.6	0.5	

단) 여기서, τ 는 매연투과율이다.

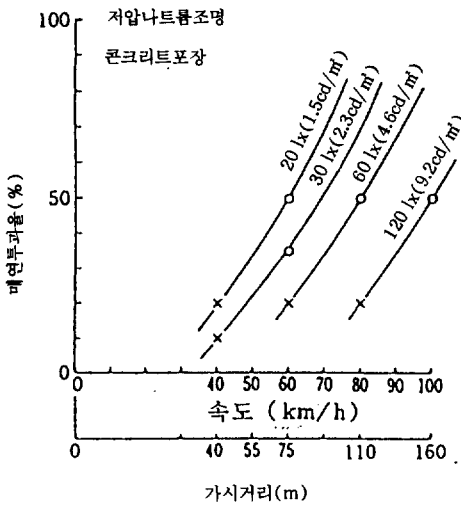


그림 2 조명조건에 따른 가시거리와 매연투과율의 관계

3.1.2 유해성분의 배출량

터널 내를 주행하는 차량에 의한 유해물질의 배출량은 차종과 주행상태에 따라 크게 다르다. 따라서 배출량을 실제에 가깝도록 예측하기 위해서는 교통량, 차종의 구성비, 주행상태에 따른 배출량의 기본값을 되도록 상세히 설정할 필요가 있다. 환기량의 산정 방법은 유해성분이 미치는 영향의 평가방법에 따라 서로 달라진다.

일산화탄소등의 생리적 영향을 고려할 경우에는 오염농도와 노출시간이 문제가 되므로 평균농도가 중요한 의미를 갖는다. 그러나 매연의 경우에는 가시거리의 확보가 문제시 되기 때문에 단

시간이라 할지라도 필요한 조건을 만족하지 않으면 안된다. 따라서 매연에 대한 환기량을 구할 경우에는 매연배출량의 분산을 고려할 필요가 있다.

표 2는 환기량 산정시 적용하는 유해물질의 배출량을 나타낸 것이다. 이 표에서 나타낸 값은 종단구배가 0%, 주행속도가 40~60km/h의 주행속도에서의 값이므로, 구배가 있거나 주행속도가 다른 경우에는 이에 대한 보정을 할 필요가 있다.

3.1.3 허용농도

허용농도(설계농도)란 환기시설의 설계에 있어서, 기계환기에 의한 소요환기량, 설비용량등을 산정할 때 기초가 되는 터널 내 유해성분 농도의 달성 목표값으로 터널내 안전주행을 확보하기 위한 오염농도이다.

(1) 매연에 대한 허용농도

터널 내에서의 가시거리는 매연농도 외에 조명의 정도, 광원의 종류, 주행속도, 포장 또는 내장과 장애물과의 콘트라스트, 장애물의 색채나 크기·형상 등에 따라 복합적으로 영향을 받는다. 따라서 매연농도에 대한 설계값을 결정함에 있어서는 이들 요인을 함께 고려할 필요가 있다. 특히 주행속도에 크게 영향을 받는 가시거리를 확보함에 있어서는, 매연투과율을 낮추면 노면조도를 증가할 필요가 있으며, 그 증가의 정도는 주행속도의 증가에 따라 급증한다는 사실에 유의할 필요가 있다.[그림 2 참조]

현행 도로터널의 기술기준에 따르면 100m당

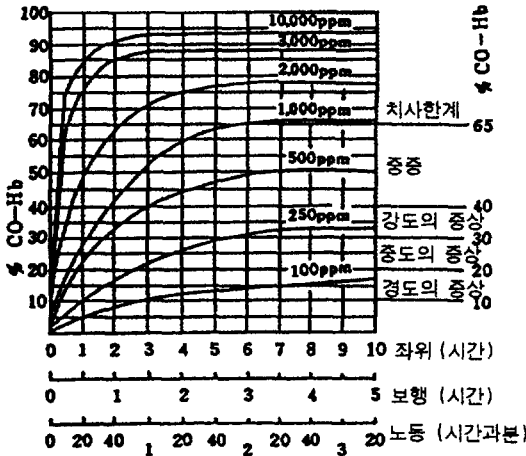


그림 3 CO농도가 인체에 미치는 영향

의 매연투과율은 주행속도 80km/h의 경우 50% 이상, 60km/h의 경우 40% 이상으로 주어져 있다. 이를 감안하여 가시거리와 매연농도의 관계로부터 정해지는 허용농도(매연투과율)의 한계를 100m당 40% 이상으로 정한 것으로 생각된다.

표 3 기본조명의 평균노면 휘도

설계속도(km/h)	평균노면 휘도(cd/m ²)
100	9.0
80	4.5
60	2.3
40 이하	1.5

(2) 일산화탄소에 대한 허용농도

일산화탄소가 인체에 미치는 영향에 대해서는 그림 3에서 보는 바와 같은 결과가 주어져 있다. 즉, 오염농도와 노출시간 및 작업의 정도에 따라 인체에 미치는 영향이 다를 수 있다.¹⁵⁾ 일반적으로 통행자의 터널 내 체류시간은 비교적 짧으므로 설계농도로서 100ppm으로 하고 있다.

그러나 도시권의 터널의 경우 정체상태를 예상할 수 있고 또, 터널의 연장이 길어지면 체재시간도 길어지기 때문에 설계농도를 보다 낮게 억제할 필요가 있다. 그리고 터널 내에서의 공사 등으로 장시간 체류가 불가피할 경우에는 별도의 대책이 요구된다.

3.1.4 환기설계에 적용하는 교통량

환기설계에 적용하는 교통량은 터널의 설계교통량을 적용하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 도시권 고속도로의 경우 피크시간대에는 설계교통량을 상회하여 거의 가능교통량(도로용량)에 달하게 되는 경우가 흔히 있으므로, 이와 같은 경우에 대해서도 대책을 강구하지 않으면 안된다.

(1) 가능교통용량 및 설계교통용량

가능교통용량이란 주어진 도로 및 교통조건에 대하여 도로가 처리할 수 있는 최대의 능력을 말한다. 이는 해당 도로의 기본교통량에 도로 및 교통조건에 영향을 의한 보정을 함으로써 다음식으로 구할 수 있다.

$$C = C_b \cdot \gamma_L \cdot \gamma_C \cdot \gamma_I \cdot \alpha_T \quad (1)$$

여기서,

- C : 가능교통용량(대/h)
- C_b : 기본교통용량(대/h)
- γ_L : 차선평에 의한 보정계수
- γ_C : 측방여유에 의한 보정계수
- α_T : 대형차 혼입에 의한 보정계수

이다.

설계교통량은 가능교통량에 도로의 계획 수준에 맞는 저감율(교통량대 교통용량비: α/c)를 곱하여 구한다. 예컨대 C=4,400대/h일 때 계획수준을 1, 저감율을 0.75라 하면 설계교통량=4,400×0.75=3,300대/h가 된다.

(2) 지체주행시의 교통량

교통지체는 교통량이 가능교통량에 접근하는 포화상태에 달했을 때 발생하는 자연지체와, 사고에 의한 지체를 생각할 수 있다. 현실적으로 도시권 고속도로 등에서 지체빈도가 높을 것으로 예상되는 터널에 대하여 지체시의 환기문제를 검토할 필요가 있다. 지체주행시의 교통량은 2차선의 경우에 식(2)로 구한 교통량을 대형차 혼입에 따른 보정을 하여 구한다.

$$N = 1,000 \frac{V}{S} \cdot 2 \quad (2)$$

$$S = 5.7 + 0.14V + 0.0022V^2 \quad (3)$$

N : 교통량[대/(h · 2 lane)]
 S : 최소 차두간격(m)
 V : 차속(km/h)

3.1.5 환기량의 산정

터널환기에 필요한 소요환기량은 우선 매연을 대상으로 터널 길이 1km에 대한 기준환기량(Q₀)을 구하여 이를 전 연장에 대한 값으로 환산하고, 아울러 속도와 구배에 따른 보정을 하여 산출한다. 또 필요에 따라 일산화탄소를 대상으로 지체시나 환기방식에 의한 특성, 외부환경에 미치는 영향 등을 검토하여 환기량을 구한 다음, 큰 값을 채용하며 일반적으로 매연에 대한 환기량이 크다.

(1) 매연에 대한 환기량계산

매연의 배출량은 엔진의 종류, 형식, 정비의 정도, 부하상태와 운전의 숙련도에 따라 다르다. 따라서 터널의 환기설계에서는 배출량을 단순 평균값으로 다루지 않고 각 자동차에서 배출되는 양의 분산을 고려하여 표준편차의 개념을 도입하여 배출량을 구한다. 즉, 환기량(Q), 매연의 배출량(μ), 허용매연농도(K, 1/m : 또는 소멸계수라 한다)의 관계를 다음식으로 정의한다.

$$\frac{\mu}{T_t \cdot Q} + \frac{3\delta}{\sqrt{2QT_tA}} \leq K \quad (4)$$

여기서,

Q : 환기량(m³/s·km)
 μ : 터널 1km당의 자동차군의 매연 발생량의 평균값(m³/km)
 δ : 터널 1km당의 자동차군의 매연 발생량의 표준편차(m³/km)
 K : 허용매연농도(m⁻¹)
 A : 터널 1km당의 내용적(m³)
 T_t : 자동차군의 평균 차두간격시간(sec),

$$T_t = \frac{3,600}{N}$$

N : 교통량(대/h)
 이다.

식(4)로부터 매연에 대한 기준환기량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \left[\frac{3\delta + \sqrt{9\delta^2 + 8\mu KA}}{60\sqrt{8A} \cdot K} \right] \cdot N \quad (5)$$

여기서,

$$q = \left[\frac{3\delta + \sqrt{9\delta^2 + 8\mu KA}}{60\sqrt{8A} \cdot K} \right] \quad (6)$$

로 놓으면 Q는 다음식으로 나타진다.

$$Q = q \cdot N \quad (7)$$

여기서 q는 자동차 1대당 1km당의 환기량으로 이를 단위환기량이라 한다. 여기에 표준상태(구배 0%, 표고 400m 이하, 주행속도 40~60km/h)에서의 δ, μ의 값을 적용하여 표준상태에서의 교통량 N에 대한 터널 연장 1km당의 기준환기량 Q₀를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_0 = q_0 \cdot N \quad (8)$$

여기서 q₀를 표준상태에서의 단위기준환기량이라 한다. 매연의 차종별 평균배출량과 표준편차는 주어지므로 대형차 혼입율을 ℓ₁이라 할 때 자동차군에 대한 매연 발생량의 평균값 μ 및 표준편차 δ는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\mu = \gamma_L \cdot \mu_1 + (1 - \gamma_L) \cdot \mu_2 \quad (9)$$

$$\delta^2 = \gamma_L \{ \delta_1^2 + (\mu_1 - \mu)^2 \} + (1 - \gamma_L) \{ \delta_2^2 + (\mu_2 - \mu)^2 \} \quad (10)$$

여기서,

μ₁ : 대형차류의 매연발생량의 평균값
 μ₂ : 소형차류의 매연발생량의 평균값
 δ₁ : 대형차류의 매연발생량에 대한 표준편차
 δ₂ : 소형차류의 매연발생량에 대한 표준편차
 이다.

(2) 일산화탄소

일산화탄소에 대한 환기량은 다음 식으로 구한다.

$$\frac{\mu}{T_t \cdot Q} \leq K \quad (11)$$

위 식을 변형하면 다음과 같다.

$$Q = \frac{\mu}{3,600K} N \quad (12)$$

여기서,

$$q = \frac{\mu}{3,600K} \quad (13)$$

로 놓고 매연과 마찬가지로 표준상태의 μ 를 적용하면 터널연장 1km당의 기준환기량 Q_0 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_0 = q_0 \cdot N \quad (14)$$

(3) 소요환기량

소요환기량 Q_{req} 는 기준환기량 Q_0 를 구배, 고도(K_i), 표고(K_h)에 대해 보정하여 다음식으로 구한다.

$$Q_{req} = Q_0 \cdot K_i \cdot K_h \quad (15)$$

3.2 PIARC방식의 소요환기량 산정 기법

3.2.1 소요환기량 산정식

소요환기량은 매연, CO, NO_x에 대해 계산하며 산정식은 각각 식(16), (17), (18)과 같다.

• 매연(soot)

$$Q_{si} = \sum_{i=\text{차종}} \frac{(q_0^T \cdot n)_i}{3,600} f_{iv} \cdot f_H \cdot \frac{1}{K_{lim}} [m^3/s \cdot km \cdot lane] \quad (16)$$

• 일산화탄소(CO)

$$Q_{req_{CO}} = \sum_{i=\text{차종}} \frac{(q_0^{CO} \cdot n)_i}{3,600} f_i \cdot f_v \cdot f_H \frac{10^6}{CO_{lim}} [m^3/s \cdot km \cdot lane] \quad (17)$$

• 질소산화물(NO_x)

$$Q_{req_{NOx}} = \sum_{i=\text{차종}} \frac{(q_0^{NOx} \cdot n)_i}{3,600} f_i \cdot f_v \cdot f_H \frac{10^6}{NOx_{lim}} [m^3/s \cdot km \cdot lane] \quad (18)$$

여기서,

i : 차종(매연에 대한 환기량 계산시는 승용차는 제외함)

n : 교통량(대/km · Lane)

$q_0^T, q_0^{CO}, q_0^{NOx}$: 매연($m^3/h \cdot \text{대}$), CO(m^3/hr

· 대), NO_x($m^3/hr \cdot \text{대}$)의 기준배출량

$K_{lim}, CO_{lim}, NOx_{lim}$: 매연(m^{-1}), CO(ppm), NO_x(ppm)의 허용농도로

f : 각종보정계수

이들에 대해서 다음절에 자세히 설명하기로 한다.

3.2.2 교통량

차종별 교통량(n_i)은 단위길이당 교통량을 의미하는 교통밀도(D ; pcu/km)로 부터 식(19)를 사용하여 구한다.

$$n_i = \frac{D \cdot \phi_i}{r_i} \quad (19)$$

여기서, ϕ_i : 차종 i 의 구성비, r_i : 차종 i 의 승용차 환산계수이다.

(1) 교통밀도

교통밀도는 전술한 바와 같이 단위길이에 주행하는 차량의 수를 의미하는 것으로 이때 차량의 수로 pcu를 사용하는데, 이것은 passenger car unit로 승용차환산대수를 의미하는 말이다.

현재 교통밀도는 그림 4의 교통밀도 산정도와 식(22)에 의해서 구하며 방법은 다음과

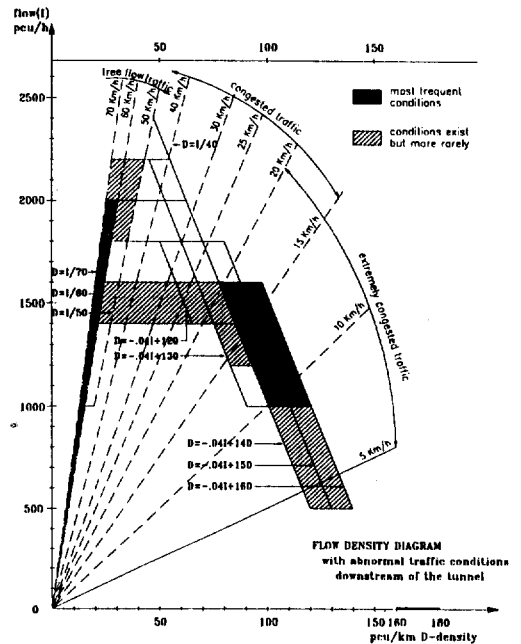


그림 4 교통밀도 산정도

같다.

그림 4는 프랑스의 터널연구센터(CETU)가 주축이 되어 프랑스의 ROND POINT 터널등 여러개의 터널에 대한 실측자료를 근거로 작성한 것으로 교통량, 교통밀도 및 주행속도등의 관계를 나타낸다. 그림에서 다음과 같은 상관관계가 있다.

$$D = -C \cdot I + A \quad (20)$$

$$I = V \cdot D$$

$$D = \frac{A}{1 + C \cdot V} \quad (21)$$

예를 들면

V = 10km/h일 때

$$D = \frac{160}{1 + 0.04 \times 10} = 114.285 (\text{pcu/km} \cdot \text{lane})$$

V = 60km/h일 때 D = I/V에서 I = 2,200 (pcu/h)를 최대교통량으로 보면

$$D = \frac{2,200}{60} = 36.67 (\text{pcu/km Lane})$$

이 된다.

식(22)는 GEO Consulting Co.가 작성하여 우리나라의 육십령 터널의 환기설계에 적용한 식으로 그 신빙성이 높은 것으로 평가받고 있다.¹⁶⁾

$$D = \frac{(D_o \times M_{max})}{[(D_o \times V) + M_{max} \times (1 - V/60)^2]} \quad (22)$$

표 5 최대교통량<일방향 터널 기준>

국 명	최대교통량(기능교통량) pcu/h · lane
PIARC 보고서	도시터널 : 1,800~2,200 안정된 터널 : 2,200~2,400
일본(도로 구조령)	1,800
영국(Webster)	1,900
미국(HCM)	1,800
독일	시외터널 : 1,800 시내터널 : 1,900
한국(도로용량편람)	고속도로 : 2,200

표 4 속도별 차량대수

(단위 pcu/km)

구 분	차 량 속 도 (km/h)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
산 정 도 표	114	83	64	54	47	37	70	80	
식(22)	M _{max} = 2,200	109	83	66	53	44	37	32	27
	M _{max} = 2,400	114	89	71	58	48	40	35	30

표 6 승용차 환산계수(권장적용값)

도로구분	차량구분	지 형		
		평 지 ^{I)}	구릉지 ^{II)}	산 지 ^{III)}
고속도로 기본구간	트럭	1.5	3.0	5.0
	버스	1.3		
2차선도로	트럭	1.9	3.5	5.5
	버스	1.6		
다차선도로	트럭	1.5	3.0	5.0
	버스	1.3		

I) 중차량이 승용차와 거의 동일한 속도를 유지할 수 있는 지형으로 종단구배가 2% 미만인 지형
 II) 종단구배가 2% 이상 5% 미만인 지형
 III) 종단구배가 5% 이상인 지형

여기서, D_0 는 주행속도가 0km/h일 때 기준 교통량으로 150pcu/km이며, M_{max} 은 최대교통량 (또는 가능교통용량)이다.

수식에 의한 산출방법은 도로의 성격에 따라 교통밀도값을 보완할 수 있는 장점이 있다. 즉 최대교통량을 어떠한 값을 적용하느냐에 따라 값이 달라진다. 표 4는 M_{max} 을 2,200, 2,400pcu/h로 하는 경우에 교통밀도 산정도에서 구한 값을 비교한 것으로 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 최대교통량은 도로의 서비스수준에 따라 차이가 있으며 우리나라 고속도로의 경우는 2,200pcu/h로 정하고 있으며,⁹⁾ 기 설계된 터널에서의 최대교통량은 서비스수준 D에서 평균 1,953pcu/h·Lane을 보이고 있다. 표 5는 각국의 최대교통량을 나타낸다.

(2) 승용차 환산계수

매연 배출량이 터널의 소요환기량 결정에 결정적인 영향을 미친다는 점에서 대형차의 승용차 환산계수(PCE : Passenger Car Equivalent)는 환기량 계산시 중요한 인자로 우리나라와 같이 대형차의 혼입율이 선진국보다 높은 경우에는 승용차 환산계수가 터널의 소요환기량에 큰 영향을 미치게 된다.^{17~21)} 즉, 대형차에 대한 승용차 환산계수가 증대하면 식(19)에서 알 수 있듯이 차량의 수가 감소하여 환기량은 오히려 감소하는 경향을 갖는다. 예로 트럭의 환산계수를 1.5에서 2.5로 적용하는 경우에 환기량은 대략 73%수준으로 감소하게 된다. 현재 터널설계시 승용차 환산계수는 표 6의 값을 적용하고 있다.

3.2.3 기준배출량, 허용농도 보정계수

(1) 매연에 대한 기준배출량(q_0^T)

매연은 터널내 입자상물질을 총칭해서 하는 말

로 디젤을 연료로 하는 버스와 트럭이 주배출원이며 연료나 윤활유로부터 발생하는 탄소입자(soot)와 hydrocarbon 및 이것들에 침적되어 있는 유황성분과 수증기등이 포함된다.²²⁾

매연의 구성성분중에서 가시거리에 영향을 미치는 것은 주로 탄소입자(soot)로 구성비는 57% 정도이다.^{23, 24)}

일반적으로 터널내 매연의 오염농도는 소멸계수(K) 또는 투과율(τ)로 나타내기 때문에 매연의 농도와 소멸계수의 관계를 명확하게 할 필요가 있으며, 이들의 상관관계를 규명하기 위한 많은 연구가 있으나^{25, 26, 27)} 그 중 대표적이며, 널리 인정되는 상관관계식은 식(23)과 같다.

$$K = 0.00625C_s \tag{23}$$

여기서, C_s 는 매연의 농도(mg/m^3)이다.

현행 중량단위(g/kWh 또는 g/km)로 나타내고 있는 매연의 규제값을 PIARC방식의 기준배출량($m^2/km \cdot 대$)으로 환산하기 위하여 식(23)을 적용하여 q_0^T 를 나타내면 다음과 같다.

$$q_0^T = 6.25 \times \phi \times s \times P \tag{24}$$

여기서, ϕ 는 매연배출량중 탄소입자의 구성비(%), s : 배출량 규제치(g/kWh), P : 차량의 출력(kWh)이다.

또한 PIARC 95에서는 탄소입자의 구성비에 대한 고려로 감소계수를 도입하고 있으며, 감소계수는 75%로 제시하고 있다. 따라서 이를 적용하면 식(24)는 다음과 같이 된다.

$$q_0^T = 4.6875 \times s \times P \tag{25}$$

표 7은 식(24) 및 식(25)를 사용하여 구한

표 7 차종별 기준배출량(q_0^T) 환산

구분	승용차	버 스		트럭			
		소형	대형	소형	중형	대형	특수
허용기준 (2000년 1월이후)	0.05g/kwh	0.1g/kwh	0.25g/kwh	0.1g/kwh	0.25g/kwh	0.25g/kwh	0.25g/kwh
엔진출력[kw]	69.1	54.4	166.2	58.8	81.6	183.8	237.9
식(24) 적용	—	20	149	22	74	165	213
식(25) 적용	—	26	195	28	96	216	279

표 8 매연기준배출량

Trucks, Bus with diesel motors(m>3.5ton)					
Emission Law	Control	q_o^{\uparrow} (V=60km/h), [m ² /h.veh]			
		truck weight (ton)			
		5	10	20	40
No Law	no	80-130	160-250	300-400	400-600
EEC R 49+24	no	80	160	240	280
• EEC R 49+24	yes	65	130	200	240
EEC 88/77	yes	50	100	160	200
US Transient 88	yes	50	100	160	200
US Transient 91	yes	30	60	100	140
US Transient 94	yes	20	40	70	110
현행수준		57	122	178	210

표 9 일산화탄소의 기준배출량

구분	승용차	버 스		트럭			
		소형	대형 226 PS	소형	중형 111 PS	대형 250 PS	특수 323.5 PS
허용기준	2.11g/km	2.11g/km	4.9g/km	6.21g/km	4.9g/km	4.9g/km	4.9g/km
적용값(m ³ /h)	0.101	0.101	0.652	0.101	0.320	0.721	0.933

표 10 NO_x에 대한 차종별 기준배출량 및 허용기준

구분	승용차	버 스		트럭			
		소형	대형 226 PS	소형	중형	대형 250 PS	특수 323.5 PS
허용기준	0.62g/km	0.62g/km	6.0g/km	1.43g/km	6.0g/km	6.0g/km	6.0g/km
적용값(m ³ /h)	0.025	0.025	0.657	0.057	0.323	0.727	0.940

차종별 기준배출량을 비교한 것으로 PIARC 95의 감소계수를 적용하는 경우가 31% 크다는 것을 알 수 있다.

또 표 8은 PIARC 91 보고서의 차량중량에 따른 기준배출량을 나타낸 것으로 현재 우리나라는 No Low 최소값을 적용하여 설계하고 있으나 2000년 이후의 우리나라의 규제량이 미국의 91년과 94년의 중간수준임을 고려하면 매연의 기준배출량이 상당히 크게 선정되고 있는 것으로 판단된다. 또 표 8에서 현행수준은 식(24)에 의해서 구해진 값을 PIARC방식으로 환산한 것이

다. 현재 도로공사에서는 PLARC 95보고서를 기준으로 하여 국내실정에 맞는 기준을 정하려 하고 있으며, 본고에 제시된 값은 적용법규와 차종 분류차이에 의해서 도로공사의 기준안과 약간의 차이가 있다.

(2) 일산화 탄소가스(CO가스)에 대한 기준 배출량 q_o^{CO}

표 9는 대기환경기준법(시행규칙 제52조)에 준한 CO의 배출허용기준을 PIARC방식의 환기량 계산에 적용할 수 있도록 일산화탄소의 비중량을 1.25kg/m³으로 하여 환산값을 나타낸 것이다.

표 11 PIARC보고서의 허용농도값

교통 형태	소멸계수($K_{in}[m^{-1}]$)	매연 투과율(%)
원활한 교통 $V_{max}=60, 80km/h$	0.005 - 0.007	50 - 60
$V_{max}=100km/h$	0.005	60
혼잡 교통	0.007 - 0.009	50 - 40
터널 폐쇄	0.012	30
터널 보수 작업	0.003 이하	75

표 12 CO의 허용농도

터널 형태	CO _{in} (ppm) 피크교통 당시	
	원활한 교통	혼잡 또는 정체
· 도시 터널 · 매일 혼잡 · 거의 혼잡하지 않음	100 - 150 100 - 150	100 - 150 150 - 250
· 도시 간 터널 (고속도로, 산악)	100 - 150	150 - 200

(3) 질소산화물(NO_x)에 대한 기준배출량

표 10은 일산화탄소와 동일한 방법으로 구한 차종별 기준배출량을 나타낸 것이다. NO_x의 비중량은 1.518kg/m³이다.

(4) 터널내 오염물질 허용농도

1) 매연의 허용농도[K_{in}]

터널의 매연농도는 전술한 바와 같이 소멸계수(K)나 매연투과율(τ)로 허용기준을 정하고 있으며, 교통의 형태에 따라 표 11과 같다.

2) 일산화탄소 허용농도

CO는 인체에 흡수되어 COHb를 형성하여 운전자의 신경계통에 영향을 준다는 인식하에 정상 운행시에는 70ppm, 지체시는 100ppm으로 규제를 강화하려는 움직임이 있으나 아직 규제화 단계에는 이르지 못하고 있다. 표 12는 현행의 CO 허용농도를 나타낸 것이다.

3) 질소산화물(NO_x)의 허용농도

차량의 배출시 NO_x는 95% 이상이 NO이나 대기중에서 광화학 반응하여 NO₂로 변하게 되는데 그 독성이 NO보다 5배이상 강한 것으로 알려져 있다. NO_x에 대한 허용농도는 전 주행속도에서 25ppm이다.

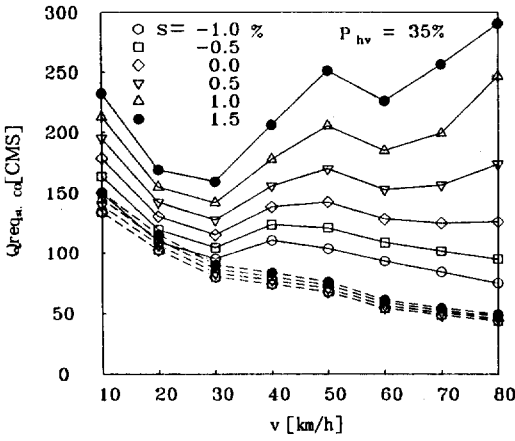
4) 보정계수

구배속도, 구배, 속도, 표고에 다른 소요환기량의 보정계수는 PIARC에서 제시한 자료에 준하여 적용한다.

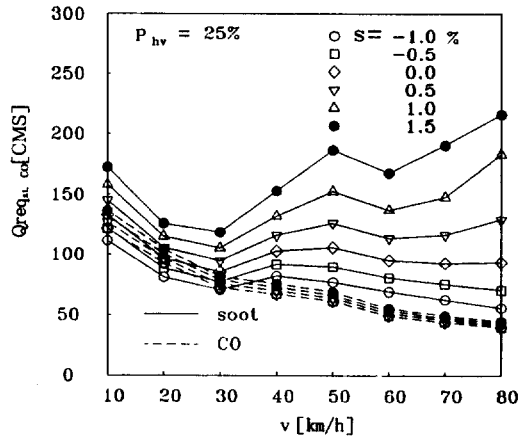
3.3 소요환기량 계산에

본 절에서는 주행속도, 구배, 혼입율이 환기량에 미치는 영향을 알아보고자 다음과 같은 조건에서 환기량을 계산 비교하였다.

- [조건] 터널의 연장 : 1km
- 터널의 단면적 : 64m²
- 접수길이 : 31.66m
- 대표직경 : 8.085m
- 표고 : 400m
- 차선수 : 2lane
- 구배 : -1에서 1.5
- 혼입율 : 25%에서 40%(여기서 혼입율은 디젤차의 혼입율임)
- 차량의 주행속도 : 10에서 80km/h
- 승용차환산계수 : 표 6값 적용
- 교통밀도 : PIARC보고서의 산정도표 적용

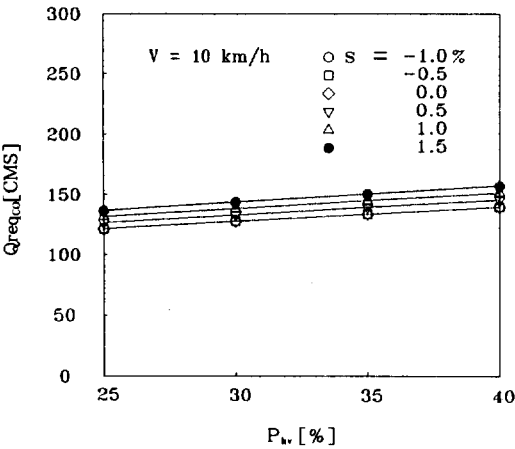


(a)

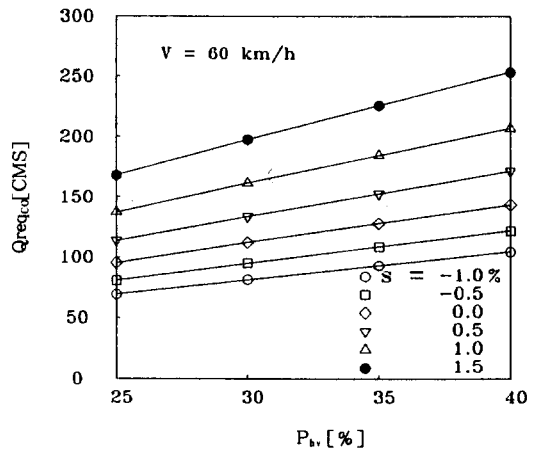


(b)

그림 5 주행속도가 소요환기량에 미치는 영향



(a)



(b)

그림 6 구배변화가 소요환기량에 미치는 영향

그림 5는 디젤차 혼입율(proportion of trucks and buses ; P_{hv} , 이하 혼입율이라 함)이 25%, 35%인 경우, 구배 (gradient ; s)에 따른 $Q_{req,soot}$, $Q_{req,air}$ 와 변화를 나타낸 것으로 그림이다.

$Q_{req,co}$ 는 속도가 증가하면 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 구배(s)에 대한 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 구배의 증가에 따른 환기량 증가는 혼입율과 속도에 관계없이 같은 증가율(구배가 -1.0에서 1.5%로 증가

하는 경우에 12.5% 증가)을 나타내고 있다.

$Q_{req,air}$ 는 구배에 따라서 크게 영향을 받고 있으며 속도에 대해서는 일정한 경향을 갖지는 않는다. 차량의 주행속도가 30km/h 이상에서는 구배가 0이하인 경우에는 40-50km/h에서 최대값을 보이며, 구배가 0보다 큰 경우에는 60km/h 이상의 속도에서 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한 정상운행시에는 $Q_{req,air}$ 가 $Q_{req,co}$ 보다 모

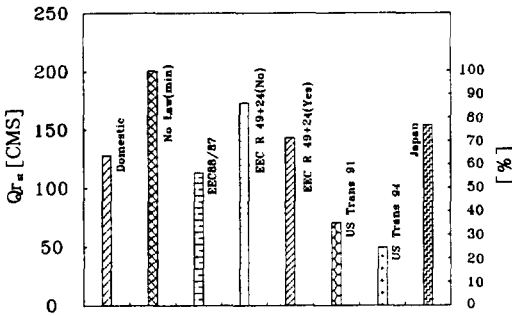


그림 7 기준매연배출량에 따른 소요환기량 비교

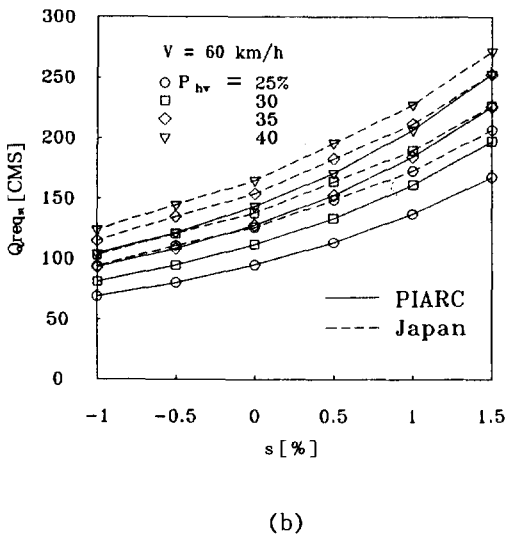
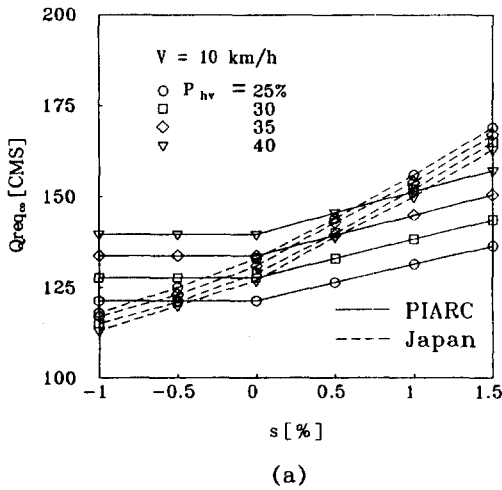


그림 8 일본방식과 PIARC방식의 환기량 비교

든 경우에서 높게 나타나고 있으나 혼입율이 작은 경우에는 저속에서 $Q_{req_{co}}$ 가 $Q_{req_{si}}$ 보다 커지게 됨을 알 수 있다.

그림 6은 혼입율에 따른 $Q_{req_{co}}$ 와 $Q_{req_{si}}$ 를 나타낸 것이다. $Q_{req_{co}}$ 는 혼입율의 증가에 따라 완만한 증가를 나타내고 있으나, 구매에 대한 값의 차이는 크지 않다. $Q_{req_{si}}$ 도 $Q_{req_{co}}$ 와 유사한 경향을 보이고 있으나 구매가 증가할수록 증가하는 경향을 갖는다.

그림 7은 각종 Emmission Law(표 8)를 기준으로 $Q_{req_{si}}$ 를 비교한 것으로 현재 매연규제치를 기준하는 경우(Domestic)는 No Law 최소값의 64% 수준이며, 일본의 계산방식과는 속도나 구매에 따른 환기량을 단순 비교하는 데는 어려움이 있으나, 60km/h를 기준으로 구매와 혼입율에 따라서 할 때 72%에서 92% 범위로 나타났다.

그림 8은 지체시의 경우를 주행속도가 10km/h 일때의 $Q_{req_{co}}$ 와 60km/h의 정상운행일때의 $Q_{req_{si}}$ 의 값을 일본방식과 PIARC(현행수준)방식으로 구하여 비교한 것이다.

$Q_{req_{co}}$ 의 경우, 일본방식보다 PIARC방식이 혼입율에 따른 변화폭이 크게 나타나고 있으며, 구매가 0인 경우(일본의 경우에 표준상태이다)에서는 혼입율이 30~35%일 때는 두 방식의 결과가 대체로 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

$Q_{req_{si}}$ 는 구매나 혼입율에 따른 경향은 거의 동일하나 PIARC방식의 계산결과가 다소 큰 값을 나타내고 있다.

참고 문헌

1. Permanent International Association of Road Congress, 1987, XIII World Road Congress, Brussels, 87 Report
2. Permanent International Association of Road Congress, 1991, XIX World Road Congress, Marrakech, 91 Report.
3. Permanent International Association of Road Congress, 1995, "Vehicle Emissions Air Demand Environment Longitudinal

- Ventilation", 95 Report.
4. Huber, 1994, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strabentunneln, RABT.
 5. 財團法人首都 高速道路技術センター, 1984. 3, トンネル換氣設計基準に関する調査研究報告書[トンネル換氣設計指針(案)]
 6. 財團法人 首都高速道路技術センター, 1993, トンネル換氣設計基準に関する調査研究報告書[トンネル換氣設計指針(案)]
 7. 財團法人 高速道路調査會, 1993, 東京灣橫斷道路トンネル換氣検討 總括報告書.
 8. 한국도로공사, 1995, 터널환기시설에 관한 연구.
 9. 건설부, 1992, 도로용량 편람.
 10. Paul Degobert, 1995, Automobiles and Pollution, SAE. Inc.
 11. 대기오염개론, 1991, 대기환경연구회, 도서출판 동화기술.
 12. 건교부, 1996, 도로교통량 통계연보
 13. 윤철욱, 1996, "도로터널 환기현황 및 문제점", 냉동공조학회, 공조부분강연회, pp. 19-37.
 14. John O. Bickel, 1996, Tunnel Engineering Handbook 2nd Ed., Chapman and Hall, New York.
 15. D. Hassel et. al., 1983, "Ermittlung des realen mittleren Emissionsverhaltens von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland im Bezugsjahr 1980", Deutsches Umweltbundesamt, Forschungsbericht 10405740/2.
 16. GEO Consult, 1992, Yuksibryung tunnels-Basic Ventilation Design
 17. TRB, 1985, Highway Capacity Manual, Special Report 209 Washington D.C.
 18. 오세현, 1987, 포화교통량과 대형차의 승용차 환산 계수에 관한 연구, 서울대석사학위논문.
 19. 임성채, 1987, "신호등이 있는 교차로의 교통용량계산에 관한 연구", 대한토목학회지, 제19권 제3호.
 20. 김동녕, 1990. 8, 고속도로에서의 대형차의 승용차환산계수의 산정, 서울대 박사학위논문.
 21. 문동주의, 1981. 12, "도로용량편람작성을 위한 기초연구", 국토개발 연구원.
 22. 조강래외, 1991, 도로의 대기질 개선에 관한 연구(III)-이동배출원의 오염물질 배출부하량 산정을 중심으로-, 국립환경연구원 자동차공해 연구소.
 23. R.Pischinger, 1974, "Exhaust Gas Legislation and Exhaust Gas Emissions of Motor Vehicles", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym., pp. 21-51.
 24. Greeves G., Wang C.H.T., 1981, "Original of Diesel Particulate Mass Emission", SAE paper 810260.
 25. 코오롱건설기술연구소, 1996.9, 차량터널 환기 시스템 최적설계 방안 연구-오염물질 농도 예측모델개발.
 26. 이창우, 이송희, 1995, "차량터널 부유분진 특성 연구-입도 및 농도 중심으로", 한국자원공학회, 65회 학술발표회, pp. 75-81.
 27. 이창우외 3인, 1996, "차량터널내 분진농도와 가시도 관계 연구", 한국자원공학회, 66회 학술발표회, pp. 155-159.
 28. D.E. Sorrels et al, 1974, "Impact of Altitude on Vehicular exhaust emissions", SAE paper, NO. 741033, p. 11.