

교통환기력에 의한 터널내 환기량 추정에 관한 연구

Estimation of Ventilation Volume by Traffic Ventilation Force in Tunnel

김종호¹⁾ · 이상철 · 도연지 · 김신도

¹⁾한서대학교 환경공학과,
서울시립대학교 환경공학과

Jong-Ho Kim¹⁾, Sang-Chil Lee, Yeon-Ji Do, Shin-Do Kim

¹⁾*Dept. of Environmental Engineering, Hansoo University,*
Dept. of Environmental Engineering, Seoul City University

Abstract

This study is to estimate the ventilation volume by the traffic that originated from driving automobiles for two tunnels(Kugi tunnel and Kumhwa tunnel) that adopted natural ventilation system among tunnels of Seoul, and on the basis of which, we estimated the ventilation volume at various conditions. With the result of the estimation, we will present the basic method that can be operated with the optimum condition for the ventilation system.

Estimating the predicted ventilation volume in the tunnel by the pollutant concentration, we used traffic volume and CO emission data by the automobile speed and CO concentration in the tunnel. And, when we estimated the traffic ventilation volume by natural and traffic ventilation force, we used traffic volume, automobile speed, tunnel area, automobile area data and so on.

As the result of simple regression between predicted ventilation volume and traffic ventilation volume, we attained the regression coefficient 0.88, and achieved the relation form that predicted ventilation volume equal $0.12 \times$ traffic ventilation volume $-92,000$. Using this equation, we estimated the ventilation volume to satisfy the environmental standards of several space, and calculated the required volume for mechanical ventilation.

In case of Kumhwa Tunnel, there is a need of mechanical ventilation all day long to satisfy air quality standard 9 ppm for 8 hours average and 10 ppm for the indoor air quality standard of public facilities.

1. 서 론

교통은 공간과 공간을 연결해 주는 기능을 갖고 있어 인간 생활의 행동 반경을 증대시켜 주는 역할을 하고 있다. 공간간의 연결은 복잡한 도로망을 중심으로 이루어 지는데 교통의 수요와 공급을 적절하게 유지한다면 도로의 효율을 극대화할 수 있다. 그러나 인구의 증가 및 자

동차의 급증 등으로 인해 대도시는 도로의 포화 상태로 이미 그 효율이 극히 떨어진 상태이며, 교통정체 뿐만아니라 교통 사고, 교통 공해 등과 같은 심각한 교통문제에 직면하고 있다. 이에 따른 교통 문제 중의 하나인 교통 체증을 해결하기 위해 새로운 도로의 건설이 계속 추진되고 있으며, 서울의 경우에는 도시고속화도로의 건설이 추진되고 있다. 그러나 도로의 건설은 원활한 교통소통을 목적으로 하기 때문에 교통 문제외에 생겨날 수

있는 환경에의 악영향에 관해서는 고려가 미흡하다.

자동차에서 배출되는 오염물질은 연료의 종류, 차종, 주행 속도, 운전 방법 등에 따라 배출량이 달라지며, 자동차의 주행 상태는 엔진의 구조 및 연료의 종류와 함께 자동차 배출가스 중의 오염물질 배출량을 결정하는 중요한 인자 중의 하나이다. 도로의 조건에 따라서도 이미 배출된 오염물질의 확산이 어려운 경우가 발생하는데 특히 터널과 같은 구조물의 경우에는 자동차로 부터 배출되는 매연이나 가스가 효율적으로 배출되지 않고, 터널 내에 정체되는 경우가 많기 때문에 운전자와 승객 및 터널 주위의 주민들에게 불쾌감을 주고 있다. 따라서 터널에 대한 환기 설비를 파악하고 환기량 해석 및 설계를 위한 방법들을 조사하여 최적 환기 시스템의 설치에 필요한 사항들을 확립하기 위한 대책 마련이 시급한 실정이다. 터널 내부의 환기는 터널 양단의 개구부에 의한 자연적인 환기력과 자동차의 주행에 따른 piston 효과에 의해 생기는 교통환기력이 있을 수 있으나 이러한 방법으로 양호한 공기질을 확보하기가 곤란할 때에는 기계를 설치하여 급배기하는 강제환기 방식을 채택하여야 한다.

본 연구는 서울시내의 터널 중 자연환기 방식을 채택하고 있는 2개 터널(구기터널, 금화터널)을 대상으로 환기 설비의 설계에 일반적으로 이용되고 있는 이론을 바탕으로 자동차 주행에 의해 생기는 교통환기력을 추정하였다. 또한 이것을 기초로 제반 조건이 달라지는 경우에 있어서도 환기량을 추정하고 최적 환기 시스템을 운전할 수 있는 기본적인 방법을 제시하고자 한다.

2. 환기량 산정에 관한 이론

2.1 오염도에 의한 환기량 추정

일반적으로 터널내에서는 교통량에 따라 자동차로 부터 오염물질이 배출되고 있으며, 터널로 유입되는 공기 중에도 오염물질이 있고, 외부로 배기되는 공기 중에도 오염물질이 포함된다. 터널 공간에서 오염물질이 유출입하는 물질수지식을 Box model을 이용하여 시간과 농도의 변화에 따라 적분한 후 터널의 농도가 일정하게 유지된다고 가정을 하면 터널 내에서 실제로 일어나는 환기량(이하 실제환기량이라 함)은 식 (1)과 같이 구할 수 있다¹⁴⁾.

$$Q = \frac{M}{C_{in}-C_{out}} \quad (1)$$

Q : 실제환기량(m^3/hr)

C_{in} : 터널내 오염도(m^3/m^3)

C_{out} : 터널외 오염도(m^3/m^3)

M : 오염물질 배출량(m^3/hr)

위 식을 이용하여 서울 시내 터널 중 자연환기 방식을 적용하고 있는 2개 터널에 있어서 일산화탄소 농도를 측정하여 실제환기량을 추정하였다. 여기서 오염물의 배출량(M)은 기존의 연구¹⁵⁾중 자동차 배출계수에 관한 부분에서 인용하여 구하였다. 즉 소형차에 있어서 일산화탄소의 배출량은 차속에 관한 일반식(배출량 = $4.63973 \times \text{차속}^{-0.455348}$)을 이용하였다. 터널내 오염 농도는 터널 내에서 직접 측정된 일산화탄소 농도를 이용하였다. 터널로 유입되는 외부의 오염 농도는 현재 운영되고 있는 대기오염 자동측정망 중 터널에 가장 인접한 광화문 측정소의 농도와 터널 입구에서 측정된 농도의 평균값으로 사용하였다.

2.2 교통환기력에 의한 환기량 산정

터널 내의 환기량을 산정할 수 있는 또 하나의 방법은 터널의 양쪽 입구 사이에 작용하고 있는 압력차를 유속으로 환산한 후 개구면의 면적을 곱하여 풍량을 산정하는 것이다. 이 때의 압력차는 터널 내에 불고 있는 자연풍과 터널 내외를 유출입하는 자동차의 piston작용에 의해 발생하는 교통환기력에 의한 것이라고 가정할 수 있다.

일반적으로 터널 내를 주행하는 자동차의 piston작용에 따른 교통환기력은 정상적인 상태에서 아래와 같은 식 (2)로 구할 수 있다¹¹⁾.

$$\Delta P = \frac{A_m}{A_r} \frac{\gamma}{2g} n V_i^2 \quad (2)$$

ΔP : 교통환기력($mmAq$)

A_m : 자동차 저항면적(m^2)

A_r : 터널 단면적(m^2)

n : 터널내 차량대수(대)

V_i : 차량 속도(m/s)

여기서 자동차의 저항면적은 자동차의 전체 높이에서 차륜의 높이를 뺀 값에 전체폭을 곱하여 산출하였고, 터널의 단면적은 터널의 폭과 높이를 곱하여 산출하였다.

터널의 개구부를 통과하는 교통환기력에 의한 환기량(이하 교통환기량이라 함)은 양쪽의 압력차에 비례하므로 식 (2)를 이용하여 식 (3)으로 나타낼 수 있다⁷⁾.

4. 2 터널의 오염도

터널의 오염도는 표 3과 같은데 전반적으로 구기터널의 오염도가 금화터널보다 낮은 경향을 보이고 있다. 터널 지점별로는 출구측의 오염도가 다소 높는데 이는 두 터널 모두 일방향 통행으로 교통 흐름에 따라 오염물질이 끝쪽으로 밀려가기 때문인 것으로 판단된다. 또한 시간대별로는 비교적 교통량이 적은 낮시간의 오염도가 가장 낮다.

4. 3 실제환기량과 교통환기량

2.1의 식 (1)을 이용하여 현 상황에서 오염도에 의해 실질적으로 회석된다고 볼 수 있는 환기량을 산정하고, 식 (2), (3)을 이용하여 교통환기력에 의한 환기량을 산정한 결과는 표 4와 같다. 실제 대기 중에서의 모든 조건을 고려한다면 앞의 2.2에서 제시한 산출식 외에도 자연풍에 의한 환기력의 가감이 필요한데, 본 연구에서는 터널 주변에서 풍향이 순간적으로 여러 각도로 변화되고, 당시의 바람이 불어오는 방향으로 가장 가까운 불광동 지점의 평균 풍속이 0.7m/s이었으며, 이 바람이 500~600m의 터널 내부를 관통하여 나갈 경우에 마찰손실과 정압손실에 의해 감속되는 것을 감안하여 자연풍 변동에 따른 환기력이 교통환기력에 비하여 미소하므로 고려하지 않았다. 또한 측정값이 출구측이 높은 것도 의

부기상의 효과가 최소화되고 있음을 의미한다.

실제환기량과 교통환기량의 상관 분석을 실시하여 상

Table 3. Concentration of CO in tunnel.

Site	Time	No.	KUGI	KUMHWA
E N T R A N C E	morning	1	5.9	9.2
	08:00	2	7.8	11.1
	~	3	10.4	7.5
	09:00	average	8.0	9.3
	afternoon	1	4.7	9.0
	13:00	2	7.1	8.9
	~	3	10.2	6.9
	14:00	average	7.3	8.3
	evening	1	5.2	10.7
	18:00	2	8.4	12.5
	~	3	11.0	8.1
	19:00	average	8.2	10.4
C E N T E R	morning	1	9.2	9.9
	08:00	2	9.7	20.1
	~	3	8.4	8.2
	09:00	average	9.1	12.7
	afternoon	1	5.0	9.3
	13:00	2	7.8	17.9
	~	3	10.4	8.0
	14:00	average	7.7	11.7
	evening	1	5.5	11.1
	18:00	2	7.7	19.8
	~	3	11.2	10.8
	19:00	average	8.1	13.9
E X I T	morning	1	6.9	14.6
	08:00	2	11.2	27.3
	~	3	13.3	11.4
	09:00	average	10.5	17.8
	afternoon	1	5.1	9.2
	13:00	2	9.4	24.1
	~	3	13.4	11.0
	14:00	average	9.3	14.8
	evening	1	6.2	10.9
	18:00	2	7.9	26.7
	~	3	11.7	13.2
	19:00	average	8.6	16.9
average			8.5	12.9

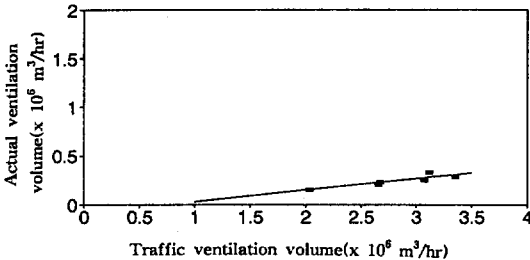


Fig. 3. Simple regression between actual ventilation volume and traffic ventilation volume.

Table 4. Actual ventilation volume and traffic ventilation volume.

Tunnel	Time	Traffic volume (veh/hr)	Speed (km/hr)	Emission rate (m ³ /hr)	Concentration (ppm)	Actual ventilation volume (m ³ /hr)	Traffic ventilation force (kg/m ²)	Traffic ventilation volume (m ³ /hr)
KUGI	09:00	1,445	60.85	0.54	9.2	200,291	3.69	2,656,631
	14:00	1,440	61.71	0.54	8.1	232,818	3.73	2,670,706
	19:00	2,016	60.00	0.76	8.3	330,143	5.08	3,115,931
KUMHWA	09:00	1,718	36.30	0.74	13.3	149,018	2.62	2,036,594
	14:00	2,632	54.00	0.96	11.6	249,024	5.96	3,074,535
	19:00	3,562	47.47	1.36	13.7	280,979	7.09	3,353,484

Table 5. Standard of CO for several space.

Regulation	Standard
Ambient air quality standard	9ppm/8hr
Ambient air quality standard	25ppm/1hr
Indoor air quality standard	10ppm
Subway air quality recommendation	20ppm/8hr
Underground parking lot air quality recommendation	50ppm/8hr
Work environment threshold limit value	50ppm/8hr
Tunnel air quality recommendation	100ppm/15min

관계수 0.88을 얻었으며 이들간의 관계는 실제환기량 = 0.12 × 교통환기량 - 92,000으로 그림 3과 같다. 따라서 교통환기력의 산출식에서 여러 대의 자동차가 일렬로 운행될 때 piston효과와 발생에는 한 대의 자동차가 받는 저항면적 중에서 12%만이 기여한다고 볼 수 있다. 또한 오염물질이 희석되는 혼합률을 K로 가정한다면 K=0.12로 매우 희석이 어렵거나 환기가 잘 안되는 구조로 되어 있음을 의미한다.

4. 4 관계식의 적용

표 5와 같이 각 공간에 대한 환경기준에서 규정하고 있는 일산화탄소의 농도 기준치를 만족하기 위하여 필요

Table 6. Required mechanical ventilation volume according to standards.

Tunnel	Standard (ppm)	Time	Required ventilation volume (m ³ /hr)	Corrected traffic ventilation volume (m ³ /hr)	Required mechanical ventilation volume (m ³ /hr)	
KUGI	9	09:00	216,315	226,868	- 10,553	
		14:00	167,338	228,557	- 61,218	
		19:00	253,110	281,984	- 28,874	
	10	09:00	154,510	226,868	- 72,357	
		14:00	127,496	228,557	- 101,061	
		19:00	189,832	281,984	- 92,151	
	20	09:00	40,058	226,868	- 186,809	
		14:00	37,710	228,557	- 190,847	
		19:00	54,238	281,984	- 227,746	
	25	09:00	29,232	226,868	- 197,636	
		14:00	27,890	228,557	- 200,667	
		19:00	39,965	281,984	- 242,019	
	50	09:00	12,432	226,868	- 214,436	
		14:00	12,115	228,557	- 216,442	
		19:00	17,257	281,984	- 264,727	
	100	09:00	5,784	226,868	- 221,084	
		14:00	5,655	228,557	- 222,872	
		19:00	8,078	281,984	- 273,906	
	KUM HWA	9	09:00	1,057,317	152,463	904,854
			14:00	788,575	277,016	511,559
			19:00	13,580,646	310,490	13,270,156
		10	09:00	435,366	152,463	282,903
			14:00	430,132	277,016	153,116
			19:00	1,234,604	310,490	924,114
20		09:00	63,258	152,463	- 89,205	
		14:00	77,565	277,016	- 199,451	
		19:00	122,348	310,490	- 188,142	
25		09:00	44,319	152,463	- 108,145	
		14:00	55,017	277,016	- 221,999	
		19:00	84,352	310,490	- 226,138	
50		09:00	17,749	152,463	- 134,715	
		14:00	22,424	277,016	- 254,592	
		19:00	33,043	310,490	- 277,447	
100		09:00	8,071	152,463	- 144,392	
		14:00	10,263	277,016	- 266,753	
		19:00	14,907	310,490	- 295,583	

한 환기량을 산정하여 기계환기의 여부를 결정하였다. 표 6에 정리한 바와 같이 필요환기량과 위의 관계식에 의해 수정된 교통환기량의 차이를 구하여 기계환기 필요량으로 결정하였는데 음의 부호를 가질 때에는 기계환기가 없어도 충분히 설정 기준을 만족할 수 있음을 나타낸다.

자연환기 방식이 적용되고 있을 때 구기터널의 경우에는 교통환기량만으로도 충분히 모든 기준치를 만족할 수 있다. 금화터널의 경우에는 대기환경기준 8시간 평균 9 ppm, 공중이용시설 실내환경기준 10ppm을 만족하기 위해서 측정된 모든 시간대에 기계환기가 필요하다.

즉 현재로써는 터널 환경 권고치인 15분 평균 100 ppm을 만족하고 있지만 자동차의 운행시 창을 개방하거나 보행자의 통행을 위해 기준 농도를 낮추게 되면 기계환기에 의해 양호한 공기질을 확보하여야 할 것이다.

5. 결 론

서울 시내의 터널 중 자연환기 방식을 채택하고 있는 구기터널과 금화터널을 선정하여 환기 현황을 파악하고 교통류에 따른 환기력을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오염도에 의한 환기량(실제환기량)과 교통환기력에 의한 환기량(교통환기량)과의 상관분석 결과 상관계수 0.88와 실제환기량=0.12×교통환기량-92,000의 관계식을 얻었다.

2. 각종 공간에 대한 환경기준에서 규정하고 있는 일산화탄소의 농도 기준치를 만족하기 위한 필요환기량을 산정하고, 관계식을 이용하여 수정된 교통환기량을 산정하였다. 두 결과를 비교하여 보면 금화터널의 경우 대기환경기준 8시간 평균 9ppm, 공중이용시설 실내환경기준 10ppm을 만족하기 위해서 전일 동안 기계환기가 필요하다.

오염도에 의한 환기량과 교통환기력에 의한 환기량의 비교에서 절대량의 큰 차이를 나타낸 것은 앞의 결과에서는 자연풍의 터널 통과에 따른 환기력의 가감이 고려되지 않았고, 실제로 고온의 자동차 배기가스가 방출될 경우에 생길 수 있는 열확산력에 관한 고려가 없었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 이러한 부분에 대한 수정을 통하여 좀 더 정확한 환기량 산출식의 제안이 가능할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원(1991) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(Ⅲ).
- 김병태 외(1989) 도시도로변에서의 이산화질소 연직 분포와 기상변화에 관한 연구, 대한환경공학회지, 11(1), 21-30.
- 김영성 외(1993) 서울시 주요 터널내 기체상 오염물질 농도 측정, 한국대기보전학회지, 9(4), 320-328.
- 서울특별시 교통관리사업소(1993) 1992년도 교통량조사자료.
- 서울특별시 교통관리사업소(1993) 1993년도 속도조사자료.
- 서울특별시 지하철공사(1992) 서울시 지하철내 환경 기준 설정 및 환경관리 방안에 관한 연구.
- 이상우 외(1993) 건축환경계획론, 태림문화사.
- 장미숙 외(1994) 차량배출물로 인한 고속도로변 CO 및 TSP의 단기오염농도의 평가, 한국대기보전학회지, 10(3), 197-202.
- 조강래 외(1982) 자동차 배출가스로 인한 터널 및 지하차도의 대기오염 실태조사 연구, 국립환경연구소보, 4.
- 조강래 외(1993) 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산정에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 69-77.
- 한국도로공사(1992) 도로터널 기술기준 및 동해설(환기편).
- 한천길 외(1991) 서울시 터널내 공기오염도 조사연구, 서울시 보건환경연구원보, 27, 238-247.
- 홍민선 외(1993) 대도시 교통신호시스템에 따른 대기오염물질 배출량 변화에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 93-100.
- Richard A. Wadden, Peter A. Scheff(1993) Indoor Air Pollution, John Wiley & Sons, Inc..
- W.K. Chow(1989) Dispersion of Carbon Monoxide from a Vehicular Tunnel with the Exit Located along a Hillside, Tunnelling and Underground Space Technology, 4(2), 231-234.
- W.K. Chow(1991) Prediction of CO Level near Vehicular Tunnel with Waiting Queue, Journal of Environmental Engineering, 117(1), 116-152.