韓國大氣保全學會誌 第 9 卷 第 4 號
J. KAPRA Vol. 9, No. 4, (1993) pp. 320-328

서울시 주요 터널내 기체상 오염물질 농도 측정

Measurements of Gaseous Pollutants in Major Tunnels in Seoul

김영성* 경남호* 조성호* 손재익* 문길주** 김용표** 백남준** 김태오**
*한국에너지기술연구소 에너지환경연구단, 305-343 대전 대덕연구단지 사서함 5호
**한국과학기술연구원 환경연구센터, 130-650 서울 청량사서함 131호

(원고접수 : 1993. 10. 14)

Y. S. Ghim*, N. H. Kyong*, S. H. Cho*, J. E. Son*,
K. C. Moon**, Y. P. Kim**, N. J. Baik**, and T. O. Kim**

*Energy and Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research, P.O. Box 5
Taedok Science Town, Taejon 305-343, Korea
**Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology,
P.O. Box 131 Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

(Received 14 October 1993)

Abstract

Gaseous pollutants in Namsan Nos. 1, 2, and 3 tunnels and Pukak tunnel were measured along the road by an air-monitoring van from the evening of February 9 to the morning of February 12 in 1993. Average concentrations of pollutants in Namsan tunnels were 9.2-13.5ppm CO and 0.037-0.047ppm SO_2. Average concentration of SO_2 in Pukak tunnel was 0.079ppm, higher than those in Namsan tunnels, due to the traffic of heavy-duty buses and trucks. The pollutant concentrations in Namsan tunnels could be explained by emissions of passenger cars using unleaded gasoline and LPG taxies. Average concentration of NO_x in Namsan tunnels was at least 1.1ppm, estimated from the emission factor of passenger cars using unleaded gasoline. Pollutant concentrations in Namsan No. 3 tunnel were higher at the exit because of the piston action of air mass in the tunnel provided by the traffic. Fans installed at Namsan and Pukak tunnels could be useful, but their flushing action of ambient air in the tunnel was not clearly observed.

1. 서 론

터널은 태양으로부터의 직접 복사가 차단되어 있을 뿐 아니라 협소한 1차원 공간내에 외기의 흐름마저 제한적이어서 대기확산의 가장 중요한 두 인자인 태양복사와 대기 흐름 어느 면에서나 불리하다. 만일 터널내 차량 정체가 심하여 많은 차량들이 동시에 다량의 오염물질을 배출할 경우 확산이 불리한 상황 속에서 대기 오염도가 높아질 것을 쉽게 짐작할 수 있다.

최근 정부 당국에서는 차량의 오염물질 배출을 억제하기 위하여 새로 출고되는 승용차에 촉매 전환기 부착과 무연 휘발유 사용을 의무화하고 경유의 황함유량을 낮추는 등 많은 노력을 기울이고 있다. 터널내의 오염현상에 대하여서도 최근 개축된 북악 터널에는 차량 통행방향으로 대형 송풍기를 설치하는 등 대책에 부심하고 있다.

본 연구는 서울시 주요 터널의 시간대별 오염현

황과 터널별 오염특성 등을 조사하고자 실시하였다. 이동측정차를 터널내로 운행하면서 터널 통과 시간 동안 연속적으로 대기를 채취하여 분석하였다. 교통이 혼잡한 남산 1, 2, 3호 터널과 최근 개축된 북악터널의 오염도를 조사함으로써 터널별 차량 통행 및 구조 조건에 따른 오염 특성을 비교하고자 하였다.

2. 측 정

1993년 2월 9일 저녁부터 12일 아침까지 4일간 출근시간, 낮시간, 퇴근시간을 구분하여 남산 1, 2, 3호 터널과 북악터널내 대기중 기체상 오염물질의 농도를 측정하였다. 측정항목은 일산화탄소, 총탄화수소, 질소산화물, 황산화물 등이었다. 2월11일 이른 아침 눈이 내렸을 뿐 측정기간 동안 특기할 만한 기상현상은 없었다.

2.1 대상터널의 특성

남산 1, 2, 3호 터널은 남산을 남북으로 관통하고 있다. 길이 방향으로 모두 터널 중앙이 높고 입구와 출구가 낮으며, 2호 터널은 북쪽인 장충동 쪽에서 약 180m 지점이 약간 굽어있다. 터널 천장의 높이는 4.7-5.1m, 폭은 9.0-10.1m이다. 터널 길이는 2호가 가장 길어 1,620m이고, 1호가 1,530m, 3호가 1,280m 등이다. 1호 터널은 왕복 2차선이나 오전 7:30~9:30과 오후 17:00~21:00 사이에는 일방통행이다. 2호 터널은 왕복 2차선이며, 3호 터널은 쌍굴로 편도 2차선이다.

1, 2, 3호 터널 모두 터널 양단 상부의 대형 송풍기로부터 천장 위의 빈 공간으로 외부 공기를 공급하고 있다. 공급된 외부공기는 천장에 일정간격으로 설치된 배기구를 통하여 터널 내부로 주입되는데 터널 중심부에서는 배기구를 통한 공기의 흐름이 매우 약한 것으로 알려져 있다.

북악터널은 정릉에서 세검정 방향으로 3도 경사의 오르막길이다. 길이는 810m, 폭 11.7m, 높이 6.3m이며, 쌍굴로 편도 2차선이다. 남산터널과는 달리 트럭의 통행이 가능하며 버스노선도 많아 대형 차량의 통행이 빈번하다. 최근 개축하며 터널내 대기흐름을 유도하기 위하여 차량 통행방향으로 천장에 대형 송풍기를 설치하였다.

2.2 농도분석

CO는 적외선흡수(gas filter correlation)법, 총탄화수소는 수소염이온화(flame ionization)법, NO_x는 화학발광(chemiluminescence)법, SO_2는 자외선형광(pulsed u.v. fluorescence)법에 의하여 각기 분석하였다. 이밖에 자외선광도(u.v. photometric)법에 의하여 오존 농도와 β선 흡수법에 의하여 PM_{10}의 농도를 측정하였으나 터널내 오존 농도는 큰 의미를 지니지 않는 것으로 판단되어 본 논문에 포함시키지 않았다. PM_{10}의 농도 역시 측정결과를 수록치 못하였는데, 측정차의 터널내 체류시간이 10~20분으로 짧아 오차가 심하였을 뿐 아니라 차의 이동에 따른 채취구 주변의 대기흐름이 대기중 분진채취에 미칠 영향을 파악하지 못하였기 때문이다.

기체상 오염물질 분석에는 미국 Thermo Environmental Instruments사의 기기들을 사용하였다. 분석방법은 모두 미국 EPA에 의하여 지정(designated)된 것들이었으나 CO의 적외선흡수법은 환경처 대기오염 공정시험방법에 규정된 방법이 아니었다.

2.3 측정방법

2월9일 낮 시험 운행결과를 토대로 측정범위를 설정하여 보정하였으며 아침, 점심, 저녁 각 시간대별 측정후 보정치로부터의 편차를 점검하였다. NO_x를 제외한 모든 오염물질이 보정된 범위내에서 측정되었음을 확인할 수 있었으나 총탄화수소는 추후 검증과정에서 2ppm 주변 낮은 농도에 대한 보정이 미흡하였던 것으로 밝혀졌다. NO_x는 측정상한인 2,000ppb를 넘는 경우도 있었으나 측정상한을 높일 경우 수십 ppb 단위의 많은 측정치들이 측정오차 때문에 부정확하여질 수 있다는 당시의 판단 때문에 2,000ppb 이상은 측정을 포기하였다.

측정차 대기 채취구의 높이가 4.1m로 높아, 비교적 터널 상층부의 오염도를 측정한 것으로 볼 수 있다. 채취된 대기가 분석될 때까지 관내 체류시간은 약 8초였다. 측정치로는 자료처리기(data logger)를 거쳐 기록계에 1분마다 기록된 순간값을 사용하였으며 SO_2는 분석기의 95% 반응시간 2분을 감안하여 측정치를 취하였다.

보통 측정은 정지된 상태에서 실시되나 본 논문의 측정은 이동상태에서 이루어졌기 때문에 이의 영향을 알아보고자 그림 1에서는 일정 농도의 기체를 분석기에 흘리며 정지상태의 측정값과 이동상태의 측정값을 비교하였다. 이동상태의 측정이 정지상태의 측정과 다른 점으로는 채취구 주변의 대기흐름과 차 운행에 따른 분석기의 진동을 생각할 수 있다. 기체상 오염물질의 경우 전자의 차이점은 무시할 수 있으므로 그림 1에서는 후자의 영향만을 조사하였다. 분석기의 진동을 극대화시키기 위하여 비포장도로를 약 15km/h로 달리는 상태에서 측정한 결과를 정지상태에서의 측정치와 비교하였으나 거의 차이점을 발견할 수 없었다.

Table 1. Average concentration of pollutants calculated from measurements at 1-minute intervals during the stay in the tunnel.*

Tunnel	Start of Measurement	Moving Direction	Residence Time (min)	Remarks	CO (ppm)	THC (ppm)	NO_x (ppb)	SO_2 (ppb)
Namsan No. 1	2/9 17:02	To south	12	Retarded after 9min drive	16.00	2.04*	886.9	26.5
	2/10 18:08	To south	20	Heavy jamming	22.04	4.72	400.6	-
	2/11 8:00	To north	6	-	10.28	0.67*	1007.7†	-
	12:49	To south	10	Transit in both directions	6.48	0.42*	687.3†	29.5
	13:04	To north	10	Transit in both directions	7.88	0.80*	805.8†	30.6
	2/12 9:16	To north	12	-	17.43	2.87	988.0†	61.9
Namsan No. 2	2/9 17:33	To south	11	Many cars passed the van.	7.70	0.60*	1059.8	48.9
	2/10 18:49	To north	4	Fast drive	9.55	0.53*	907.9	-
	2/11 8:59	To north	9	-	9.41	-	629.2	30.0
	13:49	To south	11	-	7.27	0.32*	815.6	35.2
	2/12 10:06	To north	11	-	12.07	2.04*	1150.9†	67.8
Namsan No. 3	2/9 18:09	To south	9	Following a bus	16.12	4.65	1101.6†	57.1
	2/10 17:32	To south	12	Followed by a bus	27.01	8.26	1390.6†	-
	2/11 8:15	To south	7	-	12.42	2.05*	576.8	-
	8:29	To north	8	-	18.52	6.82	963.5†	-
	12:34	To north	11	-	8.50	0.93*	570.9†	30.2
	13:35	To north	9	-	7.17	0.70*	491.9	26.4
	2/12 9:38	To south	10	-	8.78	2.56*	716.9	58.9
	10:30	To north	9	-	9.16	2.78*	838.4†	63.5
Pukak	2/12 11:08	Downward	5	No congestion	2.44	0.35*	434.3	45.4
	11:15	Upward	6	Continuously passed by buses and trucks	8.00	1.48*	1303.3†	111.7

* Recommended air quality values in the tunnel are 500ppb for NO_2 and SO_2, and 100ppm for CO; 15-minute averages (DOEnv., 1992).

* A large number of measurements were less than 2ppm which proved to be a calibration limit.

† Some measurements exceed the measuring limit of 2,000ppb.

3. 측정결과 및 고찰

3.1 평균농도

표 1은 측정차가 터널내를 운행하는 동안 1분 간격으로 측정한 오염물질의 농도를 평균한 값들이다. 질소산화물의 농도가 다소 높으나 배기가스의 대부분이 인체에 대한 위해도가 특별히 밝혀지지 않은 NO임을 고려하면 표 1에 나타난 수치로는 문제가 될 수 없다. 그러나 측정치의 상당수가 측정상한인 2,000ppb를 초과하였음에도 2,000ppb로 계산한 가운데 도출된 결과라는 점에서 보다 정확한 위해도의 판정을 위해서는 환경처의 터널 환경기준 권고치인 NO_2 500ppb를 감안한 episode 위주의 측정이 필요할 수 있다.

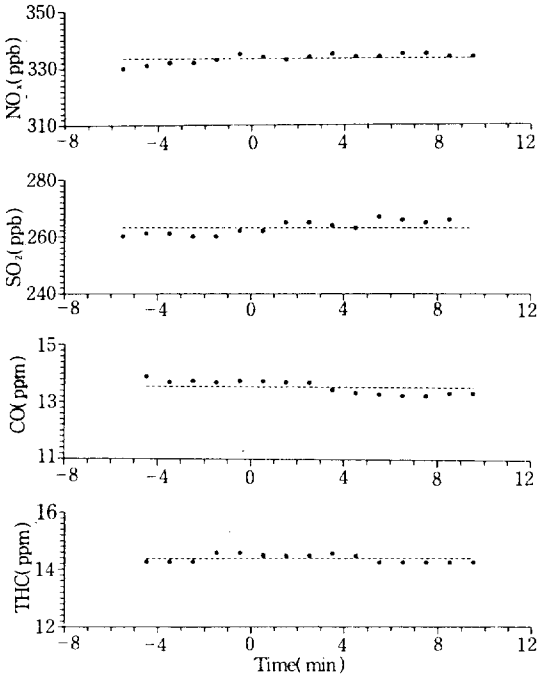


Fig. 1. Comparison of pollutant concentration measurements during the stationary and the moving states. At time is zero, the van starts to run on the unpaved road at about 15km/h.

반면 일산화탄소 등 여타 오염물질의 오염도는 환경처의 터널 환경기준 권고치와 비교하여도 충분히 낮다. 총탄화수소는 대부분 정확한 측정치를 제시하지 못하고 있으나 그 원인이 2ppm 이하 저농도 부분의 보정이 불충분하였기 때문임을 감안하면 많은 측정치들이 그리 높은 값들이 아니었던 것으로 추정된다. 그러나 안정된 물질인 메탄의 비율이 높은 서울의 보편적 총탄화수소 농도가 2~3ppm인데 비하여 (환경처, 1991) 이보다 낮은 2ppm 이하 값들이 많은 것으로 보아 저농도의 탄화수소는 실제 보다 낮게 측정된 것으로 생각된다.

표 2에서는 표 1의 측정결과를 다른 지역의 터널 측정결과와 비교하기 위하여 터널별로 평균농도를 산술평균하여 일종의 대표 평균치를 산출하여 보았다. 표 1의 질소산화물 측정치가 측정상한으로 말미암아 크게 제한되었음을 알 수 있다. 질소산화물 외에도 부산 T터널은 아황산가스의 농도가 남산 및 북악터널보다 높으며 특히 총탄화수소의 농도는 2ppm 이하의 측정이 실제보다 낮았음을 감안하여도 월등 높다.

미국 펜실베니아주 Allegheny Mountain 터널은 길이 1,850m, 남산 3호와 같은 쌍굴에 편도 2차선이나 천장에 차량통행 방향으로 송풍기가 설치되어 있다. 따라서 터널내 대기는 입구에서 출구쪽으로 강제 송풍되고 있으며, 출구 부근의 측정치에서 입구 전 터널 바깥 대기에서의 측정치를 제한 CO 5.0ppm, THC 2.0ppm, NO_x 1.38ppm을 터널내 차량배출에 의한 오염물질 농도로 제시하였다(Gorse, 1984). 터널의 길이가 더 길고 경유사용 대형 트럭의 비율이 27%로 비교적 높음에도 터널내 오염도가 표 2의 남산터널보다 특별히 심하지 않는 이유는 송풍기에 의한 강제송풍 때문으로 추측된다.

3.2 평균 오염물질 배출량

터널내 오염도가 주로 차량 배기가스로부터 비롯됨에 따라 표 3에서는 터널내 운행중인 차량의 평균 오염물질 배출량을 산출하였다. 먼저 표 2의 평균농도를 20℃ 1기압조건에서 $\mu g/m^3$ 단위로 환산한 후 터널내부 부피와 터널의 길이를 이용하여 터널내 km당 오염물 발생량을 산출하였다. 이 때 배기가스 중 총탄화수소의 평균 분자량은 가스크로마토그래피 47개 peak를 확인하여 분석한 부피비 에틸렌 25.2%, 메탄 19.4%, 아세틸렌 11.4% 등 결과를 바탕으로 (嶋村 등, 1971) 47.04를 가정하였다.

만일 터널내 평균 N대의 차량이 운행되고 있어 터널내 길이 S당 1대가 위치한다면 차량 1대의 단위길이당 평균 오염물질 배출량 E는,

$$E=CV/LN=CAS/L \qquad (1)$$

이때 C는 g/m^3 단위의 농도, V는 터널내부 부피, L은 터널길이, A는 터널의 단면적을 의미하며 S는 L/N이 된다. (1)식을 터널내 오염물질의 농도 C에 대하여 표시하면,

$$C=ELN/V=EL/AS \qquad (2)$$

차량 1대의 단위길이당 오염물질 배출이 일정하다면 터널내 오염물질의 농도는 터널길이가 길수록, 차량대수가 많을수록 높아지며, 단면적이 클수록 낮아진다.

표 3은 터널내 10m마다 차량이 1대씩 운행되고 있는 상황을 가상하여 터널내 차량의 오염물질의 평균배출을 계산한 후 국내 차량의 배출계수와 비교한 것이다. (1)식에서 볼 수 있는 바와 같이 농도가 일정한 상황에서 평균 배출량 E는 차량 1대가 차지하는 터널내 길이 S가 길수록 즉, 터널내 차량수가 적을수록 높아진다. 10m마다 차량 1대의 가정은 2차선인 터널내 한쪽 차선에서는 20m마다 차량이 1대씩 위치함을 의미하는 것으로 측정당시 관찰한 터널내 일반적 상황을 반영한 것이다.

Table 2. Representative average of pollutant concentrations in tunnels (ppm).

Tunnel	CO	THC	NO_x	SO_2	Remarks
Namsan No. 1	13.4	1.92*	0.77†	0.037	Arithmetic average of average concentrations in Table 1.
Namsan No. 2	9.2	0.87*	0.91†	0.045	
Namsan No. 3	13.5	3.59*	0.83†	0.047	
Pukak	5.2	0.92*	0.87†	0.079	
Pusan T (Cheong and Kim, 1992)	7.6	7.75	1.65	0.129	Sampling height 1.5m, sampling time 15min.
Allegheny Mountain in Pennsylvania, USA(Gorse, 1984)	5.6	3.6	1.47	-	Two-lane parallel tubes with fans on the ceiling. Measuring near the exit. Sampling height 2.2m. Averaging time 15min. Passenger car 68%, diesel truck 27%.

* A large number of measurements were less than 2ppm which proved to be a calibration limit.

† Some measurements exceed the measuring limit.

Table 3. Average vehicle emission in the tunnel by assuming one vehicle per 10m in comparison with emission factors for Korean vehicles* (g/km).

Tunnel & Vehicle	CO	THC	NO_x	SO_2	Particulate (from exhaust gas)
Namsan No. 1	5.20	1.25*	0.34†	0.03	-
Namsan No. 2	3.23	0.51*	0.36†	0.04	
Namsan No. 3	5.24	2.34*	0.36†	0.04	
Pukak	5.47	1.62*	1.03†	0.19	
Passenger car (leaded)	31.71	3.35$	1.51	0.03	0.13 (0.01)
Passenger car (unleaded)	3.27	0.45$	0.48	0.03	0.12 (0.00)
LPG taxi	6.76	0.81	1.01	0.00	0.12 (0.00)
Small bus & truck	1.75	0.17	1.44	0.60	0.52 (0.40)
Medium bus & truck	2.43	1.12	1.92	0.98	0.99 (0.76)
Heavy-duty bus & truck	17.90	2.36	15.4	2.40	2.69 (2.46)
Motor cycle	13.00	4.10	0.11	0.01	0.07 (0.01)

* From Cho et al. (1990).

* Obtained with including lots of measurements below calibration limit.

$ Excluding evaporative hydrocarbons.

† Underestimated due to the measuring limit.

비교적 측정이 정확한 CO와 SO_2를 중심으로 살펴볼 때 표 3의 결과는 터널내 오염물질이 주로 무연휘발유를 사용하는 승용차와 LPG 택시 등 오염물질 배출이 상대적으로 적은 차량들에 의하여 비롯되고 있음을 나타내고 있다. 단지 북악터널만이 대형 버스와 트럭의 빈번한 통행으로 질소산화물과 황산화물의 배출이 상대적으로 많다. 탄화수소의 농도가 낮게 측정되었음에도 배출계수와 비교할 때 CO에 비하여 탄화수소의 배출량이 많은 것은 CO보다 탄화수소 배출이 감속, 가속 등 차량 운행형태의

변화에 민감하기 때문으로 추정된다(조강래 등, 1990).

NO_x의 평균배출이 측정상한의 제한으로 현저하게 작아졌음은 이미 지적한 바와 같다. 배출계수가 가장 작은 무연휘발유 승용차의 경우도 0.48인데, 역으로 이를 이용하여 (2)식으로부터 남산터널의 NO_x 농도를 추정하면 약 1.1ppm이 된다. 즉, 1.1ppm은 남산터널 NO_x 농도의 최소한이며, 이같은 예측은 표 2의 다른 터널의 측정치와 비교하여 상당히 근사하다. 유사한 방식으로 부유분진 농도를 계산하면 역시 남산터널의 경우 대략 350~400 $\mu g/m^3$가 된다. 대형버스 등에서 배기가스와 함께 배출된 입자를 제외하고는 이들 대부분은 타이어 마모에 의한 큰 입자들이다. 그러나 부유분진의 농도 예측은 경유사용 트럭이 일부 운행되었다고는 하나 대만의 Hsing-Hei 터널에서 맑은 날 측정한 것으로 추정되는 850~3,200 $\mu g/m^3$보다 훨씬 작다(Chiang et al., 1991).

3.3 농도분포

그림 2는 CO를 대표로 하여 터널내 오염물질의 농도분포를 조사한 것이다. 엄밀하게 볼 때 오염물질 배출양상은 차량 운행형태에 따라 달라진다. 그러나 현실적으로는 심한 정체로 인하여 정차와 발차가 반복되는 상황에서는 감속, 가속, 공회전이 모두 빈번하여 모든 오염물질이 많이 발생되는 등 오염물질 배출은 평균 차속을 매개변수로 하여 종류별로 상당한 상관관계를 지니고 있다(조강래 등, 1990). 그림 3의 (a)와 (b)는 CO에 대한 탄화수소와 NO_x의 상관관계를 살펴본 것이다. 탄화수소와 NO_x가 각기 저농도 부분과 고농도 부분에서 측정이 충분치 못하였음에도 불구하고 두 오염물질 모두 CO에 대하여 상당한 상관성을 보여주고 있다. 또한 아황산가스는 휘발유 및 LPG 사용 차량이 대부분인 상황에서 크게 중요하지 않으므로 그림 2에서는 CO의 농도분포만을 조사하였다.

그림 2의 농도분포는 측정차가 터널을 통과하는 시간을 1.0으로 보고 터널을 통과하는 동안 1분단위로 측정한 농도를 표시한 것이다. 남산터널은 각 터널별로 아침, 점심, 저녁에 측정한 값을 1차내삽(linear interpolation)에 의하여 평균하였다. 표 1의 남산터널의 측정상황을 살펴보면 대체로 교통이 혼잡한 방향에서 측정하였으나 아침에 도심에서 남쪽으로 이동하거나 저녁때 남쪽에서 도심으로 이동하는 등 반대방향에서 측정한 경우가 있다. 남산 2호의 2번째와 3호의 3번째, 7번째가 그들인데 그림 2에서는 일관성을 유지하기 위하여 이같은 방향의 측정은 평균에서 제외하였다.

먼저 남산터널을 살펴보면 3호 터널의 저녁시간의 오염도가 명백히 높고 1호 터널의 점심시간의 오염도가 낮다. 그러나 2호 터널의 경우는 시간대별로 오염양상이 매우 유사하다. 북악터널에서 오르막길의 오염도가 내리막길보다 높은 것은 충분히 예측할 수 있는 결과이다. 대체로 출구나 출구에 근접하여 오염도가 높은 반면 1호 터널의 오염도 분포는 매우 복잡하다.

터널내 대기흐름을 유도할 수 있는 인자로는 차량 운행과 터널 외부의 바람, 부력에 의한 자연대류, 그리고 만일 송풍기가 설치되어 있다면 이의 영

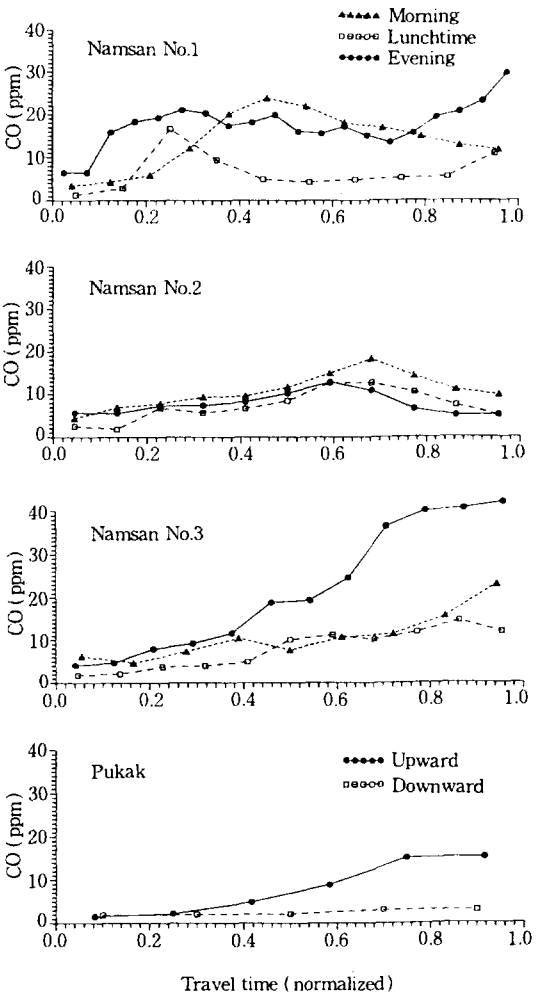
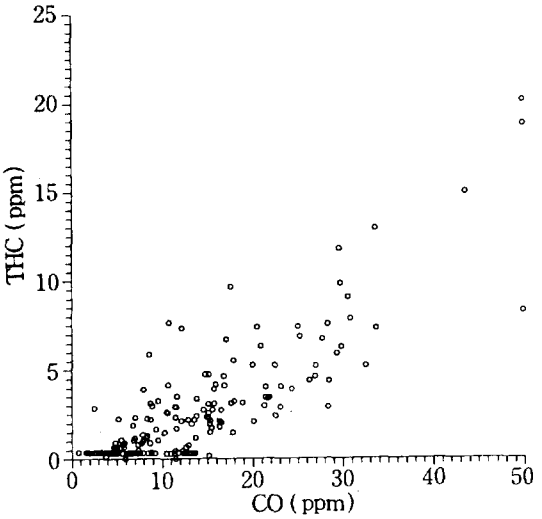
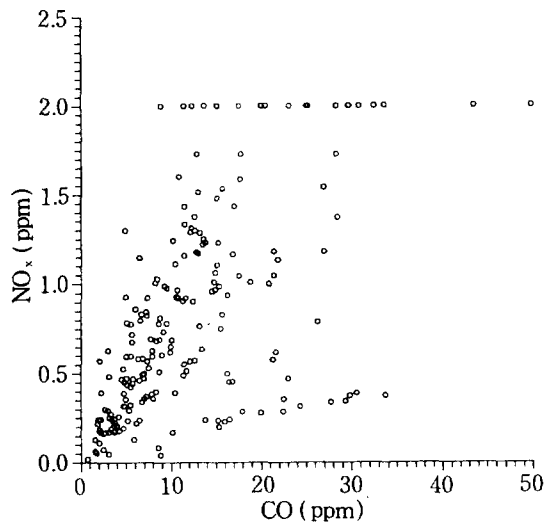


Fig. 2. Average concentration profile of carbon monoxide in the tunnel as a function of travel time.



(a) CO vs. THC. Correlation coefficient is 0.848.



(b) CO vs. NO_X. Correlation coefficient is 0.665.

Fig. 3. Correlations between CO & THC, and CO & NO_X, respectively.

향을 들 수 있다. Gorse(1984)는 Allegheny Mountain 터널에서 송풍기의 영향을 60%, 차량운행 효과를 30%, 외부 바람의 영향을 10%로 추정하였는데 이때 터널 출구 부근의 평균 풍속은 7.7m/s였고 차량의 평균속도는 84km/h였다. 송풍기가 없는 대만의 Hsing-Hei 터널 출구 부근에서 측정한 풍속은 3~4m/s였으며(Chiang et al., 1991), 부산 T터널의 측정결과는 0.7~4.3m/s이나 정체가 심할 때는 무풍조건도 기록되고 있다(정장표와 김광수, 1992).

부력에 의한 자연대류는 터널내 경사가 3~4도를 넘지 않고 길이방향으로 강제대류가 존재하는 상황에서는 큰 영향을 미치기 어려우므로 우선적으로 영향인자에서 배제할 수 있다. 서울과 같이 평균 풍속이 낮은 경우 터널 외부 바람의 영향은 지역단위의 바람보다는 출구 및 입구에서 터널 내 외부 사이의 온도차이에 의한 대기 흐름 정도가 의미가 있을 수 있는데, 만일 존재한다면 입구와 출구 부근의 농도 희석효과를 이로써 설명할 수 있다. 차량운행에 따른 기류이동은 배출원인 차량과 함께 언제나 입구에서 출구로 향하므로 정상적으로 차량이 운행되는 한 출구쪽의 농도가 높아질 수 밖에 없다.

3호 터널의 농도분포는 차량 운행효과가 두드러진 예로 볼 수 있다. 2호 터널에서 농도분포의 최대점이 출구에서 안쪽으로 이동한 것은 반대차선의 차량운행 때문으로 해석할 수 있다. 1호 터널 저녁시간의 농도가 일찍부터 높아진 것은 차량정체가 심했던 때문으로 생각된다. 차량정체가 심할 경우 차량운행에 의한 대기흐름이 원활치 못할 뿐 아니라 정체 양상에 따라 측정차 운행속도도 변하여 횡축의 운행시간이 터널내 거리와 크게 달라질 수 있다.

3.4 송풍기의 효과

터널내 농도분포에 대한 송풍기의 영향은 송풍기가 어떻게 설치되었느냐에 따라 달라진다. 북악터널과 같이 차량통행 방향으로 송풍기가 설치되었을 때에는 송풍기의 효과가 차량운행 효과와 중복되므로 별도로 조사하지 않는 한 구별하기가 어렵다. 단지 Allegheny Mountain 터널에서와 같이 터널내 오염도가 운행차량의 오염물 배출에 비하여 낮다면 그 효과를 짐작할 수 있을 따름이다. 그러나 표 2 및 3, 그림 2의 결과로부터 북악터널의 송풍기 효과를 판단하기는 어렵다.

남산터널은 터널 양단에서 외부 공기를 송풍기로 흡입하여 터널내로 공급하고 있다. 따라서 만일 터널 외부의 공기가 충분히 깨끗하다면 터널 양단부터 안쪽 방향으로 송풍기의 영향이 미치는 한 터널내 오염된 공기가 외부의 신선한 공기와 혼합되어 오염도가 저하되고, 터널내 오염도는 중심부근에서 최대가 될 수 있다. 그림 2의 남산터널의 농도분포 중 이같은 경향을 보인 것은 1호 터널의 아침과 2호 터널의 경우이다. 그러나 2호 터널의 농도분포는 차량통행 효과와 중첩되므로 송풍기의 효과를 구별하기 어렵다. 1호 터널만이 차량통행으로는 설명하기 곤란한 농도분포를 나타내고 있으나 유사한 현상이 다른 곳에서 관찰되지 않았다는 점에서 단언하기 힘들다.

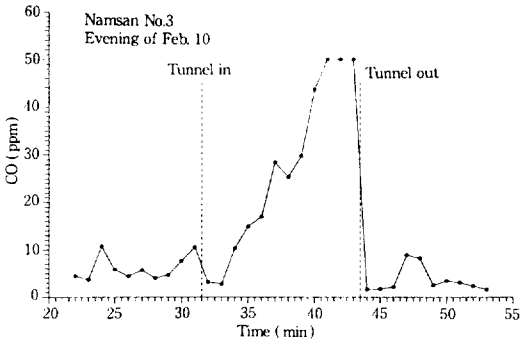


Fig. 4. Concentration profile of carbon monoxide along the road through Namsan No. 3 tunnel from 17:22 to 17:53 on February 10, 1993.

남산터널에서 송풍기의 효과를 이같이 예상한 것은 터널 외부의 공기가 충분히 깨끗하다고 가정하였기 때문이다. 그러나 터널 입구에서 차선이 줄어듦에 따라 차량들이 심하게 정체되는 경우도 많아 그림 4에서는 측정기간 중 입구 정체가 심하였던 2월 10일 저녁 남산 3호 터널의 진입 전과 벗어난 후 대기중 CO 농도를 터널내 농도와 비교하였다. 보편적 대기상황에 비추어 입구까지 농도가 상당히 높은 것은 사실이나 터널내 농도에 비할 바는 아니며 특히 터널을 벗어남에 따라 농도는 급속히 감소하고 있다. 따라서 남산터널의 경우도 송풍기의 효과를 기대할 수 있으나 그림 2의 농도분포에서는 그 효과가 두드러지지 않고 있다.

4. 검 토

본 측정이 오랜 시간 준비끝에 이루어진 것이기는 하나 터널내 현실을 충분히 파악하지 못함에 따라 검토과정에서 많은 불완전한 점이 노출되었다. NO_x 측정이 고농도 부분에서 실패하였던데 비하여 탄화수소 측정은 측정상한이 너무 높아 2ppm 이하 저농도 부분에서 부정확하였다. 채취구의 높이가 4.1m에 이르러 천장의 높이가 4.7~5.1m에 불과한 남산터널에서는 천장에 60cm까지 근접하기도 하였다. 그림 2의 농도분포에서 명확히 드러나지는 않았지만 만일 천장 배기구로부터 신선한 외부 공기가 효과적으로 공급된다면 이같은 높이에서는 터널내 대표치를 측정할 수 없음은 물론이다.

차량이 정체되어 차량운행에 의한 대기의 흐름이 급속히 저하된 상태에서 오염도가 높아지는 위급상황에 대비하기 위하여 차량운행과 구별된 송풍기의 효과는 반드시 조사되어야 할 부분이다. 송풍기가 가동되지 않는 남산 1호 터널에 차량의 정체가 심하여 1, 2m 간격으로 차량이 늘어서서 1km/h 정도로 매우 천천히 이동한다면 차량은 20분 가까이 100ppm의 고농도 CO에 노출될 수 있다. 터널내 대기흐름을 파악하기 위하여서는 대기흐름의 모델링과 함께 추적자 실험 등이 유용할 수 있다. 이와 함께 보다 안전하게는 터널내 1, 2대의 오염물질 농도측정 시설을 갖추어 국지적으로라도 오염도가 위험수위에 달하면 터널내 방송을 통하여 차량의 시동을 멈추게 하는 등의 조치를 취할 수도 있다.

5. 결 론

1993년 2월 9일 저녁부터 12일 아침까지 이동측정차를 이용하여 총 21차례 남산 1, 2, 3호 터널과 북악터널의 대기중 기체상 오염물질의 농도를 측정하였다.

1. 남산터널의 평균 오염도는 일산화탄소가 9.2~13.5ppm, 아황산가스가 0.037~0.047ppm이었다. 3호 터널의 오염도가 대체로 높았고 1호, 2호 순이었다. 북악터널은 길이도 짧고 차량통행 방향으로 송풍기가 설치되었음에도 CO가 다소 낮을 뿐 남산터널과 유사하였으며, 오히려 대형차량의 통행으로 아황산가스의 오염도가 평균 0.079ppm으로 가장 높았다.

2. 북악터널이 다소 예외이긴 하나 모두 전형적인 무연휘발유 사용 승용차와 LPG 택시에 의한 오염양상을 보였다. 무연휘발유 사용 승용차의 배출계수를 이용하여 질소산화물의 평균농도를 추정한 결과 최소 1.1ppm으로 나타났는데, 이같은 추정은 부산 T터널의 1.65ppm이나 미국 Allegheny Mountain 터널의 1.47ppm과 비교할 때 상당히 타당한 근사치였다.

3. 남산 3호 터널이 차량운행에 따른 기류 이동의 영향으로 출구부분의 오염도가 높았던데 비하여 2호 터널은 반대차선의 영향이 겹쳐져 출구 훨씬 안쪽의 오염도가 높았다. 1호 터널의 저녁시간은 심한 정체로 전반적으로 오염도가 높았던 반면, 아침시간은 터널 중앙이 높았다. 대체로 점심시간의 오염도가 낮았으나 2호 터널은 시간대별 구분이 거의 없었다.

4. 남산터널과 북악터널 모두 송풍기의 효과는 특별히 관찰되지 않았다. 그러나 차량운행에 따른 기류이동을 촉진시킬 수 있는 북악터널의 송풍기는 물론, 터널 외부의 공기로 터널내 오염된 공기를 희석시키고자 하는 남산터널의 송풍기도 정상적으로 가동된다면 효과는 충분히 기대할 수 있었다.

〈감 사〉

본 측정 소요비용의 일부를 지원하여 주신 조선일보사에 감사드립니다. 남산터널의 송풍기 설치 상황과 총탄화수소 측정의 문제점 등 부족하였던 점을 상세히 지적하여 정확한 논문이 작성될 수 있도록 도와주신 논문 심사위원님께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

정장표, 김광수 (1992), "터널오염도와 그 영향인자에 관한 연구," 경성대학교 환경연보, 2, 45～56.

조강래, 엄명도, 김종춘, 홍유덕, 박용희, 김종규, 김연호, 유정호, 김응중, 김선문(1990), "도시지역 대기질 개선에 관한 연구(II) - 이동배출원의 오염물질 배출부하량 산정을 중심으로 -," 국립환경연구원보, 12, 55～69.

환경처(1991), "한국환경연감".

환경처(1992), "환경백서".

嶋村晴夫, 山口隆章, 清水凶(1971), "自動車排ガス公害 - その實態と對策 -," 化學工業社.

Chiang, P. C., J. W. Lee, and C. F. Wang(1991), "Source contributions to total suspended particulates in Hsing-Hei Tunnel at Taipei City," *Proc. 2nd IUAPPA Regional Conf. on Air Pollution*, Vol.2, pp.265～272.

Gorse, R. A., Jr. (1984), "On-road emission rates of carbon monoxide, nitrogen oxides, and gaseous hydrocarbons," *Environ. Sci. Tech.*, *18*, 500～507.