

서울시 터널 내 휘발성 유기화합물질 방출특성

환경연구개발팀, 자동차공해연구팀*
오달영 · 조석주* · 여인학 · 김주형

Emission of Volatile Organic Compounds from Traffic Activity in Roadway Tunnels of Seoul

*Environmental Research and Development Team and Automobile Pollution Research Team**

Dal-young Oh, Suk-ju Cho*, In-hak Yeo and Joo-hyung Kim

Abstract

Investigations of volatile organic compounds(VOCs) were conducted in Namsan No.3 and Hongjimun roadway tunnels in Seoul for the year 2007. The targeted VOCs in this study were(1) the toxic aromatic hydrocarbons from fuel, some of which are carcinogens, as toluene, benzene, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene, 1,2,4-trimethylbenzene and (2) CFCs from refrigerant causing ozone depletion such as freon 12(CFC-12), freon 114(CFC-114), freon 11(CFC-11), freon 113(CFC-113) were also investigated.

The VOCs in the tunnel environment was influenced by temperature to exhibit low concentrations in summer and high in winter. Toluene concentrations were the highest as 20.7 and 28.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and m,p-xylene concentrations were followed as 12.4 and 11.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Namsan No.3 and Hongjimun tunnels respectively.

For CFCs, freon 114 concentrations were the highest as 1.24 and 4.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and freon 12 concentrations were followed as 1.05 and 2.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Namsan No.3 and Hongjimun tunnels respectively.

Key words : volatile organic compounds, tunnel, CFCs

서론

시민 생활의 질을 떨어뜨리는 도시 대기 오염은 대부분 자동차에 의한 것으로 알려져 왔다. 시내에서 자동차의 운행으로 발생하는 오염물질 중 특히 VOCs(Volatile Organic Compounds, 휘발성

유기화합물)는 오존전구물질(ozone precursor)로 오존 등 광화학 산화성물질을 생성시켜 광화학 스모그를 유발한다. 또한 벤젠과 같은 VOCs는 발암성을 가지고 있기도 하다.

일반적으로 VOCs는 0.02 psia 이상의 증기압을 갖거나, 끓는점이 100℃ 미만인 유기화합물로 정의

한다. 대개 메탄을 제외한 휘발성 유기물을 대상으로 하며, C2에서 시작하여 C8까지의 포화 불포화 탄화수소가 여기에 속한다. EPA에 의하면 VOCs는 벤젠, 톨루엔, 프로판, 부탄, 헥산 등 광화학 반응성이 에탄보다 큰 318종의 물질과 이들 물질을 포함한 진증기압(True Vapor Pressure : TVP)이 1.5 psia 이상인 석유화학제품 및 유기용제 등을 말한다. 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산, 금속성 탄산염 및 탄산암모늄을 제외한 탄소화합물에 해당하는 이들은 대기 중에서 태양광선에 의해 질소산화물(NOx)과 광화학적 산화반응을 일으켜, 지표면의 오존농도를 증가시키며 스모그현상을 일으킨다. 이때 메탄, 에탄, 메틸클로라이드, 메틸클로르포름, 클로르플로르오르탄소류 및 퍼플로르탄소류 등과 같이 광화학 반응성이 낮은 화합물은 제외하고 있다(1). 미국 EPA TO-14 및 국내 대기오염공정시험법(2)에 의하면 환경대기중 유해 VOCs는 대략 40종이다. 이 때 이들은 대부분 벤젠고리 중심의 방향족 또는 할로젠화 탄화수소이다.

도시 대기 중 VOCs에 대한 연구 방법의 하나로 터널 연구는 관심의 대상에 속한다. 이에 대한 연구는 주로 오염물질의 터널 내 농도 프로파일을 통하여 차량에 의한 오염 추세를 판단하는 것이다. 터널 내 VOCs에 관한 연구는 VOCs 농도 그 자체에 중점을 두고 하는 경우도 있으나 주로 VOCs와 차량과의 연관성을 두고 결론을 도출하는 경우가 대부분이다. Carvalho 등은 차량 기인에 의해 생성된 오염의 정도와 대기 중 광화학 반응에 의해 생성된 것을 구분하기 위해 터널 내외부에서 측정을 수행하였다(3). Mei-Yin Hwa 등은 터널 내 VOC 측정을 통하여 배출계수를 구하였으며, 톨루엔, 에텐, 1,2,4-트리에틸벤젠의 순서로 농도가 높게 나타났다(4). 또한 Niedojadlo 등은 용제 사용과 차량에 따른 비메탄 VOCs 발생 기여율을 구하기 위하여 공기 조성을 조사하였다. 이때 차량에 의한 방출 양상을 터널 내 측정을 통하여 구하였다. 그 결과 용제의 사용보다 차량에서의 발생이 대기 중 비메탄계 휘발성유기화합물(NMVOCs)의 조성을 좌우한다고 하였다(5). 자동차에서의 VOCs의 발생 경향을 보고자 Fraser 등은 터널 내 VOCs 배출 조성을 배기관 배출원

테스트 데이터 값 및 연소하지 않은 가솔린의 값과 비교하여, 배기관에서의 VOCs 발생량이 전체의 74~97%를 차지함을 확인하였다(6). 또한 Legreid 등은 터널에서 산화휘발성유기화합물(OVOCs)과 비메탄계 탄화수소(NMHCs)를 측정 한 결과 산화휘발성유기화합물(OVOCs)의 경우 대형디젤차량(HDV)이, 그리고 NMHCs는 중소형 디젤차량(LDV)이 주도함을 확인하였다(7). VOCs 중 CFCs 또한 터널 내 많이 발생하고 있으며, 오존층 파괴 주범으로 많은 관심의 대상이 되어왔다. Stemmler 등은 VOCs 발생량을 10년 전과 비교하여 비축매 가솔린 연료차량의 감소를 확인하였다(8). 또한 Stemmler 등은 터널 내 냉매 발생을 조사하여 CFC-12와 HFC-134a의 발생은 주로 차량의 냉방시스템에서의 손실에서 비롯되었으나, 반면에 HCFC-22는 냉동차량의 이동시 손실에서 비롯한다고 하였다(9). Rubin 등은 터널 연구를 통하여 차량에서 VOCs 방출시 증발(evaporation) 대 배기구(tailpipe)를 통한 배출의 상대적 기여도를 결정하였으며, 또한 증발에 대한 기여율이 대기 온도와 양(+)의 상관 관계에 있음을 확인하였다(10).

국내에서도 몇몇 연구를 통하여 터널 내 오염물질의 측정에 대한 시도가 이루어졌다. 이와 같은 문헌들의 연구 결과를 참조하여 서울시의 터널에서 발생하는 VOCs의 농도를 긴 기간에 걸쳐 측정하고 그 발생 현황 및 특징을 파악하고자 하였다. 본 연구는 2007년도에 측정된 터널 내 VOCs 데이터를 분석 및 해석하였다.

실험방법

2007년 서울시의 남산 3호 터널과 홍지문터널에 대하여 1) 3월 5~9일, 2) 5월 7~11일, 3) 8월 20~24일, 4) 11월 12~16일의 네 차례에 걸쳐, 오전 10~11시경 터널 내 VOCs 샘플을 채취 분석하였다. 채취 지점은 남산 3호 터널의 경우 도심방향으로 320 m 안쪽 지점이며 홍지문 터널의 경우 성산방향으로 1,240 m 안쪽 지점이었다. 분석 대상 VOCs는 차량의 연료 연소를 통해 발생하는 방향족

화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, m,p-자일렌, o-자일렌, 1,2,4-트리메틸벤젠의 6종으로 선택하였다. 이 중 벤젠과 같은 성분은 발암성 물질로 분류되며 그 외 성분들도 그에 대한 우려가 있는 물질들이다(11). 또한 차량의 냉매에서 발생하는 염화불화탄소류(chlorofluorocarbons, CFCs) 중 TO-14에 의한 유해물질로 지정되어 있는 프레온 12, 프레온 114, 프레온 11, 프레온 113의 4종을 분석하였다. 각 물질에 대한 화학식 및 CAS NO.를 표 2에 표시하였다.

본 연구는 국내 대기오염시험방법 ES 01652.1 및 EPA의 TO-14, 15 및 17에 따른 고체 흡착법으로 실험을 수행하였다. 이 방법은 일정량의 흡착제로 충전한 흡착관에 시료를 채취하여 열탈착기를 이용하여 열탈착을 유도하는 것이다. 이를 다시 저온농축관에서 채취(농축)한 후 다시 2단

열탈착하여 고분리능 Capillary-Column을 이용한 기체크로마토그래피에 의해 분석대상물질을 분리하여 GS/MSD로 측정한다.

Table 1. Characteristics of each tunnel

Tunnel	Length	Lane(One way)
Namsan 3rd	1,260 m	2 lane
Hongjimun	1,890 m	3 lane

본 실험에서는 Carbotrap 300을 흡착관으로 사용하였다. 총 채취 유량은 Sibata Σ 30 mini pump를 이용하여 이 1.5~2.0 L을 맞추었다. 분석기기는 Markes 사의 열탈착기와 Agilent 사의 GC/MSD를 이용하였으며, 각각의 기기 조건을 표 3과 4에 나타내었다.

Table 2. Properties of analysed VOCs

No.	VOCs	CAS No.	Formula	M.W.
1	Freon-12	75-71-8	Cl_2CF_2	120.91
2	Freon-114	76-14-2	$\text{ClCF}_2\text{CClF}_2$	170.93
3	Freon-11	75-69-4	CCl_3F	137.38
4	Freon-113	76-13-1	$\text{CF}_2\text{ClCCl}_2\text{F}$	187.38
5	Benzene	71-43-2	C_6H_6	78.12
6	Toluene	108-88-3	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	92.15
7	Ethylbenzene	100-41-4	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5$	106.17
8	m,p-Xylene	108-38-3 106-42-3	1,3(4)- $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$	106.17
9	o-Xylene	95-47-6	1,2 $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$	106.17
10	1,2,4-Trimethylbenzene	95-63-6	1,2,4- $(\text{CH}_3)_3\text{C}_6\text{H}_3$	120.20

Table 3. Analytical conditions of ATD

Manufactures and Model name	Markes Unity thermal desorber
Tube desorption temperature	300°C
Tube desorption time	10 min.
Tube desorption flow	20 mL/min.
Cold Trap adsorptive	Carbotrap
Cold Trap Concentration temp./ Desorption temp.	Concentration temp. -10°C Desorption temp. 300°C
Cold trap hold time	10 min.
Split Flow Rate	Inlet Split : 0 mL/min, Outlet Split : 15.3 mL/min. Split Ratio : 15.3 : 1
Carrier gas	He, 8 psi

Table 4. Analytical conditions of GC/MS

Manufactures & Model name	Agilent 5978B-6890N System
GC column model	Agilent HP-1 60 m × 0.32 mm × 1 μm
GC column flow	1 mL/min
GC oven temp	hold 40°C for 5 min. and up to 200°C by 8°C/min and hold 2 min. and then up to 220°C by 10°C/min. and hold 8 min.
Ionization mode	EI, 70 eV
MS Mode	Scan 45~550 amu
MS temp:	
Ion source	Ion source : 230°C
MS analyzer	MS Quad. : 150°C

결과 및 고찰

1. 방향족 탄화수소(Aromatic hydrocarbons)

남산 3호 및 홍지문 터널에서 방향족 VOCs의 평균 발생 농도 및 크기와 순서를 살펴보면 남산 3호 터널의 경우 톨루엔 20.7, m,p-자일렌 12.4, 벤젠 6.9, 1,2,4-트리메틸벤젠 4.7, 에틸벤젠 3.3, 그리고 o-자일렌은 2.5 μg/m³로 나타났다.

반면 홍지문 터널은 톨루엔 28.7, m,p-자일렌 11.9, 벤젠 10.8, 1,2,4-트리메틸벤젠 3.6, 에틸벤젠 3.3, 그리고 o-자일렌은 2.6 μg/m³로 나타났다.

차량이 많고 정체가 심한 홍지문 터널 내 VOCs 발생이 훨씬 높을 것으로 예상되었다. 실제로 톨루엔이나 벤젠의 경우 그 값이 남산 터널에 비해 높게 나타나고 있었다. 그러나 차량이 3배나 많은 것에 비해 그 증가량은 그다지 크지 않다. 게다가 다른 물질의 경우는 두 터널에서의 농도가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 대기 중 평균 잔류시간(life time)의 차이에 의한 것으로 추정할 수 있다. 평균잔류시간은 벤젠의 경우 19.3일, 톨루엔은 3.6일, 에틸벤젠 3일, 자일렌의 경우 1~2일로 알려져 있다(12). 실제로 두 터널에서 벤젠은 1.6배, 톨루엔은 1.4배, 나머지 물질의 경우는 1.0배 내외로 나타나, 잔류시간의 영향을 의심케 하였다.

물론 교통량에 비해 온도, 습도, 풍속의 영향이

커서, 터널 내부에 잔존하는 양이 어느 정도 일정하게 유지되고 있는 것으로도 추정해 볼 수 있다.

해당 VOCs의 측정기간대별 농도 변화 추이를 그림 1과 2에 제시하였다. 두 터널 모두 봄에 낮게 나타나고 점점 증가하여 겨울철에 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

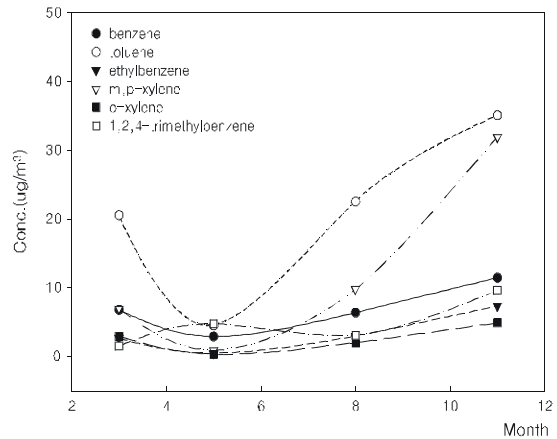


Fig. 3. Monthly concentrations of CFCs in the Namsan No.3 Tunnel.

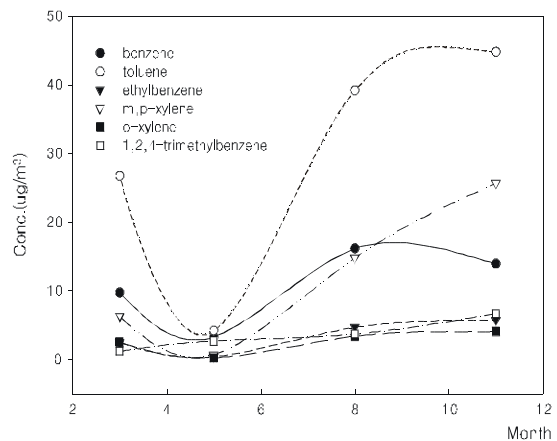


Fig. 2. Monthly concentrations of aromatic hydrocarbons in the Hongjimun tunnel.

터널 내 VOCs는 표 5, 6에서와 같이 각자에 대하여 양의 상관관계를 보이고 있다.

교통량, 온도, 습도, 풍속 등의 인자들과 오염량의 관계를 알아보면 남산 터널과 홍지문 터널은 약간의 차이를 보이거나 비슷한 양상이다. 소통이

비교적 원활한 남산 터널의 경우 표 5에서와 같이 전반적으로 교통량에 대해서는 양의 상관관계를 보이며, 온도, 습도, 풍속에 대하여는 음의 상관관계를 보인다. 이는 온도가 높을 때 VOCs의 확산이 활발하고 풍속이 클 때 터널 내 순환이 잘되어 외부로 배출되기 때문으로 판단된다.

반대로 교통량이 많고 정체가 심한 홍지문 터널은 교통량에 대해 음의 상관관계를 보였다. 습도, 풍속에 대해서는 남산터널의 경우와 마찬가지로 음의 상관관계를, 온도에 대해서는 일정한 경향성

이 없었다(표 6). 즉 차량의 양이 과도하여 VOCs의 발생이 고농도로 지속되는 경우, 온도의 영향은 그다지 크지 않음을 짐작할 수 있었다.

덧붙여 톨루엔/벤젠의 비는 오염원의 원인을 밝히는 인자로 Bravo 등은 가솔린 엔진의 경우 2.8, 디젤 엔진의 경우 5.6로 제시하였다(13). 남산 터널에서의 톨루엔/벤젠의 비는 3.0, 홍지문 터널에서는 2.7로 분석되었으며 이로 인해 터널 내 VOCs 발생의 주 원인자는 휘발유 차량임을 알 수 있었다.

Table 5. Correlations between aromatic hydrocarbons and meteorological factors in the Namsan No.3 tunnel

	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	m,p-Xylene	o-Xylene	1,2,4-Trimethyl benzene	Traffic	Temp.	Humid.	Wind
Benzene	1.00									
Toluene	0.91	1.00								
Ethylbenzene	0.95	0.95	1.00							
m,p-Xylene	0.93	0.89	0.98	1.00						
o-Xylene	0.96	0.95	0.96	0.93	1.00					
1,2,4-Trimethylbenzene	0.79	0.68	0.83	0.85	0.77	1.00				
Traffic	0.16	0.37	0.37	0.34	0.36	0.33	1.00			
Temp.	-0.22	-0.17	-0.18	-0.17	-0.35	-0.02	-0.03	1.00		
Humid.	-0.27	-0.27	-0.38	-0.34	-0.30	-0.38	-0.26	0.32	1.00	
Wind	-0.27	-0.29	-0.37	-0.42	-0.27	-0.43	-0.50	-0.38	0.06	1.00

Table 6. Correlations between aromatic hydrocarbons and meteorological factors in the Hongjumun tunnel

	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	m,p-Xylene	o-Xylene	1,2,4-Trimethyl benzene	Traffic	Temp.	Humid.	Wind
Benzene	1.00									
Toluene	0.85	1.00								
Ethylbenzene	0.90	0.95	1.00							
m,p-Xylene	0.89	0.90	0.96	1.00						
o-Xylene	0.92	0.91	0.97	0.94	1.00					
1,2,4-Trimethylbenzene	0.80	0.76	0.89	0.94	0.87	1.00				
Traffic	-0.24	-0.14	-0.20	-0.27	-0.16	-0.29	1.00			
Temp.	0.10	0.01	0.04	0.00	-0.06	0.09	0.35	1.00		
Humid.	-0.30	-0.31	-0.41	-0.47	-0.35	-0.56	0.56	0.32	1.00	
Wind	-0.26	-0.38	-0.34	-0.39	-0.28	-0.40	-0.01	-0.38	0.06	1.00

2. 염화불화탄소류(CFCs)

현재 주로 사용하는 냉매는 HFC-134a로 노후화된 차량의 경우 프레온 114나 프레온 11, 12 등을 병존하는 상태이다(본 연구에서 HFC-134a는 TO-14에 의한 유해한 VOCs에 해당하지 않아, 분석대상에서 제외하였다). 분석 결과를 살펴보면 주로 8월 이후에 뚜렷하게 고농도로 나타난다(그림 5, 6). 남산 터널의 경우 평균 측정값은 프레온 114 1.24, 프레온 12 1.05, 프레온 11 0.71, 프레온 113 0.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 홍지문 터널의 경우 평균 측정값은 프레온 114 4.50, 프레온 12 2.23, 프레온 11 1.80 그리고 프레온 113 0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

CFCs의 경우 소량 발생하는 프레온 113을 제외하고는 남산 터널보다 홍지문 터널에서 모두 2~3배 이상으로 나타났다. 이는 앞서도 언급한 바 있는 대기 중 잔류시간의 영향에 의한 것으로 CFCs의 대기 중 잔류시간이 매우 길다는 점에서 이러한 가정을 확인할 수 있다.

또한 프레온 114가 여전히 많이 사용되고 있음을 알 수 있으며, 특히 프레온 112는 대형 터보 엔진을 쓰는 차량의 냉매로 사용되고 있어 대형디젤 차량(HDV)으로부터의 영향을 짐작할 수 있었다.

CFCs의 경우 이들은 각자에 대하여 양의 상관관계를 보이며, 교통량, 온도, 습도, 풍속에 대한 상관관계는 각각의 터널에 대하여 위의 방향족 VOCs의 발생 경향과 일치하는 것으로 나타났다(표 7, 8).

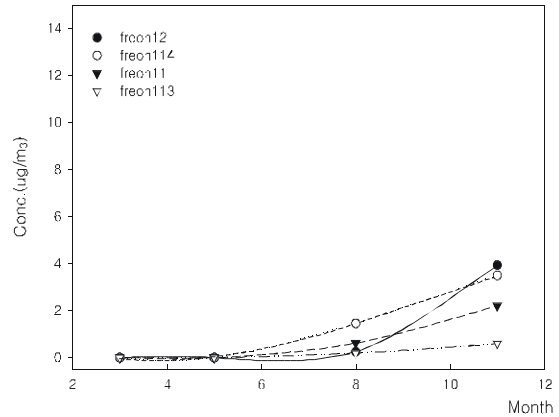


Fig. 3. Monthly concentrations of CFCs in the Namsan No.3 Tunnel.

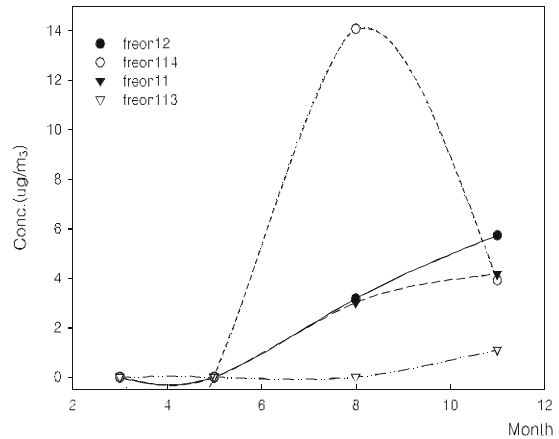


Fig. 4. Monthly concentrations of CFCs in the Hongjimun Tunnel.

Table 7. Correlations between CFCs and meteorological factors in the Namsan No. 3 tunnel

	Freon 12	Freon 114	Freon 111	Freon 113	Traffic	Temp.	Humid.	Wind
Freon 12	1.00							
Freon 114	0.61	1.00						
Freon 111	0.86	0.47	1.00					
Freon 113	0.75	0.30	0.66	1.00				
Traffic	0.48	0.60	0.38	0.34	1.00			
Temp.	-0.21	-0.01	-0.03	-0.03	-0.03	1.00		
Humid.	-0.39	-0.06	-0.37	-0.30	-0.26	0.32	1.00	
Wind	-0.39	-0.22	-0.44	-0.44	-0.50	-0.38	0.06	1.00

Table 8. Correlations between CFCs and meteorological factors in the Hongjumun tunnel

	Freon 12	Freon 114	Freon 11	Freon 113	Traffic	Temp.	Humid.	Wind
Freon 12	1.00							
Freon 114	0.72	1.00						
Freon 11	0.87	0.73	1.00					
Freon 113	0.49	0.03	0.64	1.00				
Traffic	0.07	0.31	-0.18	-0.54	1.00			
Temp.	0.08	0.40	0.15	-0.19	0.35	1.00		
Humid.	-0.22	0.19	-0.34	-0.55	0.56	0.32	1.00	
Wind	-0.42	-0.28	-0.46	-0.36	-0.01	-0.38	0.06	1.00

결론

서울시내 남산 3호 터널과 홍지문 터널에서 휘발성 유기화합물질(VOCs)의 농도를 측정하고 결과 연료에 기인한 방향족 VOCs와 냉매로부터 기인한 CFCs류를 확인할 수 있었다.

남산 3호 터널에서 방향족 VOCs는 평균적으로 톨루엔 20.7, m,p-자일렌 12.4, 벤젠 6.9, 1,2,4-트리메틸벤젠 4.7, 에틸벤젠 3.3, 그리고 o-자일렌은 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

반면 홍지문 터널은 톨루엔 28.7, m,p-자일렌 11.9, 벤젠 10.8, 1,2,4-트리메틸벤젠 3.6, 에틸벤젠 3.3, 그리고 o-자일렌은 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

방향족 VOCs는 봄에 가장 낮은 농도를 보였으며 점점 증가하여 겨울철에 높아졌다. 또한 교통량에 대해서는 양(+)의 상관관계를, 온도, 압력 및 풍속에 대해서는 (-)의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 홍지문 터널과 같은 정체가 심한 터널은 온도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

또한 톨루엔/벤젠 비의 값이 남산 3호 터널의 경우 3.0, 홍지문 터널의 경우 2.7로 계산되어 VOCs의 주 발생원은 휘발유 차량에 의한 것으로 예측된다.

남산 3호 터널에서 CFCs류는 평균 프레온 114 1.24, 프레온 12 1.05, 프레온 11 0.71, 프레온 113 0.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

반면 홍지문 터널의 경우 평균 프레온 114 4.50, 프레온 12 2.23, 프레온 11 1.80 그리고 프레온 113 0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

CFCs는 프레온 114와 프레온 12의 발생이 두드러졌으며 여름철 이후 발생이 나타나고 있다. 현재 규제로 인하여 위 두 물질을 잘 사용하지 않으므로 노후화된 디젤 차량의 영향이 큰 것으로 사료된다.

터널 내부 대기의 연구를 통하여 차량으로 인한 도시 대기 오염의 특징을 예측할 수 있으며, 정책의 효과를 확인할 수 있다. 이에 따라 앞으로 몇 해에 걸친 지속적 연구를 통하여 더욱 의미있는 성과를 이루고, 이에 바탕한 기술적, 정책적 해법을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원 : 저 VOCs 배출 천연도료의 개발 연구보고서, 2004.
2. 환경부 : 대기오염공정시험법 개정판. ES 01652.1, 2007.
3. Carvalho LRF, Vasconcellos PC and Pool CS : Volatile organic compounds inside urban tunnels of São paulo City, Brazil. J of Geophysical Research, Vol. 7, 2005.
4. Hwa MY, Hsieh CC, Wu TC and Chang LW : Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area. Atmospheric Environment, 36(12):1993~2002, 2002.
5. Niedojadlo A, Becker KH, Kurtenbach R and Wiesen P : The contribution of traffic

- and solvent use to the total NMVOC emission in a German city derived from measurements and CMB modelling. *Atmospheric Environment*, 41(33):7108~7126, 2007.
6. Fraser MP, Cass GR and Simoneit BRT : Gas-Phase and Particle-Phase Organic Compounds Emitted from Motor Vehicle Traffic in a Los Angeles Roadway Tunnel. *Environ. Sci. Technol.*, 32(14): 2051~2060, 1998.
 7. Legreid G, Reimann S, Steinbacher M, Staehelin J, Young D and Stemmler K : Measurements of OVOCs and NMHCs in a Swiss Highway Tunnel for Estimation of Road Transport Emissions. *Environ. Sci. Technol.*, 41(20):7060~7066, 2007.
 8. Stemmler K, Bugmann S, Buchmann B, Reimann S and Staehelin J : Large decrease of VOC emissions of Switzerland's car fleet during the past decade : results from a highway tunnel study. *Atmospheric Environment*, 39(6):1009~1018, 2005.
 9. Stemmler K, O'Doherty S, Buchmann B and Reimann S : Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, and CFC-12 from Road Traffic: Results from a Tunnel Study(Gubrist Tunnel, Switzerland). *Environ. Sci. Technol.*, 38(7):1998~2004, 2004.
 10. Rubin JI, Kean AJ, Harley RA, Millet DB and Goldstein AH : Temperature dependence of volatile organic compound evaporative emissions from motor vehicles. *J. of Geophysical Research*, 111, 2006.
 11. IARC(International Agency for Research on Cancer) : Overall Evaluations of Carcinogenicity to Humans(<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/crthgr01.php>).
 12. 한국대기보전학회 측정분과위원회 : 대기환경과 휘발성유기화합물질. p 21, 1998.
 13. Bravo H, Sosa R, Sánchez P, Bueno E and González L : Concentrations of benzene and toluene in the atmosphere of the southwestern area at the Mexico City Metropolitan Zone. *Atmospheric Environment*, 36(23):3843~3849, 2002.