

## 자동차 운행과 관련한 PM10 및 일산화탄소 노출 평가 Exposure to PM10 and Carbon Monoxide (CO) Associated with Automobile Travels

조 완 근\* · 이 진 우

경북대학교 환경공학과

(2001년 4월 25일 접수, 2001년 8월 17일 채택)

Wan-Kuen Jo\* and Jin-Woo Lee

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University Taegu, 702-701

(Received 25 April 2001; accepted 17 August 2001)

### Abstract

This study included three experiments to evaluate in-vehicle exposures to PM10 and CO: 1) evaluation of in-passenger car exposures, 2) evaluation of in-public bus exposures, and 3) simultaneous evaluation of in-passenger car and in-university bus exposures. The tests of four factors (transportation mode, passenger-car type, commute period, and commute season) were focused. A total of 40 actual passenger car commuters, 20 public bus commuters, and four university buses were recruited or surveyed. The same commuters were participated in both the summer and winter studies. Two factors such as transportation mode and passenger-car type were found to have little effect on the in-vehicle levels of PM10 and CO. Commute period was found to have little effect on the in-vehicle CO levels. Conversely, the other factor, commuting season was found to influence on the in-vehicle levels of PM10 and CO.

The present study also confirmed that under the Korean commute conditions, vehicle interiors are an important microenvironment for exposure to PM10 and CO. This was supported by finding that the in-vehicle air levels were much higher than ambient air levels reported by several previous studies. The mean in-vehicle PM10 concentrations were 114 and 103  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for passenger cars and public buses, respectively. For CO, the mean in-vehicle concentrations were 2.9 and 2.6 ppm for passenger cars and public buses, respectively.

**Key words** : CO, commute, driving, in-vehicle, PM10

### 1. 서 론

차량 운행 중 탑승자의 대기오염물질 노출에 관

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)53-950-6584, E-mail : wkjo@knu.ac.kr

한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다. 이들 자동차 탑승 노출과 관련한 주요 대기오염물질로서 휘발성 유기화합물질 (volatile organic compounds, VOCs)을 들 수 있다. VOCs는 일반 대기보다 차량 실내에서 높은 농도로 존재하고, 또한 이들 VOCs에 의한 건강 위해성 (health risk) 때문에 미국의 환경 보호국

(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)의 Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study에서는 VOCs에 대한 개인 노출이 차량의 사용과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고하였다 (Wallace, 1987). 최근의 차량 사용과 관련한 VOCs 노출에 대한 국외 연구들은 휘발유 사용과 관련이 없는 일상 활동에 비해, 출퇴근시 차량 내에서 5 내지 24 종류 VOCs의 상승된 농도에 노출이 되고 이로 인한 개인의 건강 위해성이 증가된다고 주장하였다 (Chan *et al.*, 1993; Wixtrom and Brown, 1992; Weisel *et al.*, 1992; Bevan *et al.*, 1991; Chan *et al.*, 1991a, b; SCAQMD, 1989). 또한 이들 국외 연구들에 근거하면 차량 운행 중 배출되는 미연소 및 연소 생성물, 그리고 차량의 휘발유성분 휘발로 인해 도로에서의 VOCs 농도는 일반 대기 농도보다 높아지고, 이렇게 VOCs로 오염된 도로상의 공기가 차량 내로 침투하기 때문에 차량 내의 VOCs 농도가 증가된다. 국내의 경우에도 출퇴근시 차량 탑승자의 VOCs 노출에 대한 연구가 수행 및 발표된 적이 있다 (Jo and Park, 1998, 1999a, b; Jo and Choi, 1996).

더욱이, 자동차 연소 가스는 도시 도로상의 VOCs 뿐만 아니라 호흡성분진 (respirable particulates)인 PM10과 일산화탄소(CO)의 주요 배출원으로도 알려져 있다 (Williams, 2000; Gertler *et al.*, 1995; Bevan *et al.*, 1991). 따라서, 자동차 연소 가스는 PM10과 CO에 대한 도로상의 오염도를 증가시키고, 증대된 이들 오염물질들도 VOCs와 마찬가지로 차량 내로 침투하여 이들 오염물질에 대한 탑승자의 노출을 증대시킬 수 있다 (Rodes *et al.*, 1998; Flachsbart, 1995). 그러나 VOCs와는 달리 PM10과 CO에 대한 차량 운행 중 노출 평가 연구는 매우 미흡한 실정이다. 특히 PM10의 경우 자동차가 아닌 다른 실내외의 오염에 대한 연구는 국내에서도 최근 다수 수행되었으나 (김병화와 김동술, 2000; 나덕재와 이병규, 2000; 최성우와 송형도, 2000; 서영화 등, 1999; 백성욱 등, 1998; 유정석 등, 1995), 차량 운행 중 노출에 대해서는 국내외를 통틀어 현재까지 Rodes *et al.* 연구 (1998)가 유일한 것으로 보고되고 있다. 차량 운행 중 탑승자의 CO 노출 연구는 국내외에서 일부 수행된 바 있으나 이들 물질에 대한 노출 및 위해성 평가를 수행할 만큼 충분한 자료를 제공하지 못하고 있는 실정이다 (Fernandez-Bremauntz and

Rodes *et al.*, 1998; Jo and Park, 1998; Flachsbart, 1995).

따라서, 본 연구는 우리 나라의 주요 두 개 운송 수단인 승용차 및 시내버스 또는 대학 출퇴근버스를 이용해서 출퇴근할 때 탑승자들의 PM10과 CO 노출을 평가하고자 고안되었다. 한편, 국내에서 유일하게 수행된 차량 운행 중 CO 노출 평가에 대한 연구 (Jo and Park, 1998)에서는 실질적인 주행노선이 아닌 가상의 주행 노선을 선정하여 수행되었기 때문에 본 연구에서는 연구참여자들의 실질적인 출퇴근 주행 노선을 이용한다. 본 연구 결과는 PM10과 CO에 대한 개인 노출원 (personal exposure sources) 연구, 자동차 탑승자의 위해성 평가 및 이들 오염물질들의 자동차 제작 정책을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험 고안

운행 중 자동차 탑승자의 PM10과 CO 노출 평가를 위해서 세 개의 실험이 고안되었다. 가상이 아닌 실제 출퇴근 노선 상에서 승용차를 이용하여 출퇴근하는 운전자들의 노출 평가가 첫째 실험이며, 시내버스를 이용하여 출퇴근하는 버스 탑승자들의 노출 평가가 둘째 실험이다. 마지막 셋째 실험에서는 대학 출퇴근버스를 승용차가 뒤따를 때 두 차량에서 동시에 PM10과 CO의 오염도를 측정하였다. 위 첫 두 실험은 여름철 (2000년 6월부터 8월까지) 과 겨울철 (2000년 11월부터 2001년 1월까지)에 수행되었고 세 번째 실험은 가을철 (2000년 9월부터 10월까지)에 수행되었다.

#### 2.1.1 조사대상 자동차

첫 두 실험을 위한 자동차로서 무연휘발유 연료의 승용차와 경유 연료의 시내버스 두 종류가 선정되었다. 승용차의 경우, 전자연료주입식엔진의 차량이며 엔진용량에 따라 중대형 그리고 소형의 두 그룹으로 구분되어 각각 20대씩 선정되었다. 중대형의 경우 엔진용량이 1,800 cc 이상인 차량 그리고 소형인 경우 1,500 cc 이하인 차량으로 정의된다. 또한 각 그룹은 신형차량 및 구형차량으로 구분되어 각각 10대씩 다시 구분·선정된다. 신형차량은 1998

년 모델 이후 그리고 주행거리가 20,000마일 이하인 차량으로 정의되고 구형차량은 1995년 이후 1997년 이전 모델 차량으로서 주행거리가 40,000마일 이상인 차량으로 정의된다. 시내버스의 경우에는 좌석이 40에서 50석 사이인 대구시내 운행 좌석버스 20대가 실험을 위해서 선정되었다. 한편, 세 번째 실험에서는 경북대학교 교직원 출퇴근 버스 4대와 소형 승용차 두 대가 이용되었다.

2. 1. 2 주행노선

주행노선의 형태는 차량 탑승자의 대기오염물질 노출에 주요한 변수로 알려져 있으므로, 본 연구에서도 주행노선이 주요한 실험고안 변수로서 고려되었다. 이전에 수행된 대부분의 선진연구에서는 실험의 편의를 위해서 주행노선이 실제상황이 아니라 가상적으로 설정되어 운행 중인 차량 탑승자들의 대기오염물질 노출이 평가되었다. 본 연구에서는 차량 종류에 관계없이 가상적인 아닌 실제 주행노선을 이용하여 PM10과 CO에 대한 차량 탑승자의 노출을 평가하고자 하였다. 승용차의 경우는 실험에 참여하는 차량의 운전자가 실제 출근 또는 퇴근할 때 운전석 옆 승객석의 호흡영역에서 PM10 시료를 채취하고 CO 농도를 측정하였다. 첫 두 실험에서는 실험시간의 보편성과 객관성을 고려하여 실험대상자는 그들의 일상 출근 또는 퇴근 운행시간이 30분에서 60분 이내인 경우에만 선정되었다. 버스의 경우 대구시를 운행하는 좌석버스의 실제 노선을 이용하였다. 세 번째 실험에서는 경북대학교 출퇴근 버스 노선 6개 중에서 4개의 노선이 선정되었다.

2. 1. 3 조사시간 및 조사시기

조사시기는 세 실험 모두에서 출퇴근 시간이며 조사시간은 실험에 따라 두 가지로 구분되었다. 첫 두 실험을 위한 조사시간은 위에서 언급한 바와 같이 30분에서 60분 이내에서 실험대상 차량의 실제 출근(07:00~09:00) 또는 퇴근(17:30~19:30) 시간동안 PM10 및 CO의 오염도가 조사·평가되었다. 세 번째 실험에서는 경북대학교 출퇴근 버스가 학교를 출발하여 다시 학교로 돌아올 때까지를 조사시간으로 하였다.

2. 1. 4 운행 조건

탑승차량의 환기정도가 탑승자들의 대기오염물질

노출에 영향을 미치는 주요 인자에 해당한다. 따라서, 본 연구에서는 환기상태를 제어하기 위해서 실험대상 차량의 운전자에게 문과 차량 환기구를 닫고 운행하도록 제안하였고 대부분의 운전자들이 본 제안을 따라 주었다. 버스의 경우, 승객들의 승하차로 인한 차량 문의 개폐는 제어될 수 없기 때문에 차량 문의 개폐 횟수를 기록하였다. 탑승자들의 대기오염물질 노출에 영향을 미치는 또 다른 주요 운행조건으로서는 차량 실내에서 운전자 또는 승객들의 흡연을 들 수 있다. 본 실험에서는 탑승자 전원에 대해 탑승 중에는 흡연을 하지 않도록 조절하여 흡연으로 인한 차량 노출 평가 영향을 제어하였다.

2. 2 PM10 및 CO 측정

PM10 시료를 채취하기 위해서 본 연구에 사용된 시료 채취기는 Air-Metrics의 진지 사용이 가능한 MINIVOL Portable Sampler (Model 4.2)이다(최성우와 송형도, 2000). 이 기기는 실내공기측정에 적합한 기기로서 소형이라 휴대가 용이하며, 작동을 자동으로 조절할 수 있는 프로그램이 장착되어 있다. 채취유량을 적정으로 유지시키는 기능을 갖고 있어서 적정유량을 10% 이상 벗어나면 자동으로 작동이 멈추는 기능을 갖고 있다.

본 연구에 시용된 여과재는 Teflon coated glass-fiber (Pallflex, Putnam)이었다. 모든 여과재는 사용 전후 온도(25±2°C)와 습도(50±2%)가 일정하게 유지된 항온·항습장치(desiccator)에서 24시간 이상 조절화시킨 후 무게를 달았다. 항온·항습장치에서 24시간동안 조절화된 여과재를 0.001 mg까지 칭량할 수 있는 전자미세저울(Electronic Microbalance; Sartorius M2P, Goettingen, Germany)을 이용하여 여과재를 칭량한 다음 여과재 지지장치(filter holder)에 넣고 이중 지퍼가 달린 밀폐 가능 백에(bag) 세운 상태로 넣어 임시 보관하였다. 다음 단계에서는 시료채취기의 정상작동여부(적정유량 및 경과시간 등)를 확인한다. 보관 백에 보관된 여과재 지지장치를 시료채취기에 부착하고 여과재 지지장치를 시료채취기 본체에 장착한 후에 한번 더 적정유량(5 lpm)을 확인한 다음 대상차량에 탑승하여 차량내부 시료채취를 시작하였다. 전체 채취 시간에서 기기의 정상작동여부를 점검한 시간을 제외한 순수 채취 시간만을 실제 채취시간으로 하고 이러한 과정을

통해서 출근시에 사용한 여과재를 저녁의 퇴근시간에도 사용할 수 있도록 여과재 지지장치내에 여과재를 넣은 상태로 항온항습된 데시케이트에서 다음 채취시간까지 보관하였다. 퇴근시에는 출근시와는 달리 여과재 지지장치 및 전지를 장착한 시료채취기를 다시 운반하여 출근시와 동일한 방법으로 시료를 채취한 다음 여과재 지지장치를 시료채취기에서 탈착시켜서 이중지퍼가 달린 보관 백에 여과재 지지장치를 넣어서 최대한 밀봉을 한 후 시료 채취시와 동일한 자세(수직방향)를 유지하면서 가능한 빠른 시간내에 실험실로 운반하였다. 여과재 지지장치에서 여과재를 분리하여 항온·항습 장치에서 24 시간동안 조절화한 후에 미리 검정(calibration)된 미세저울로 여과재의 무게를 칭량하는데, 한 개 시료에 대해서 5회 이상 반복 칭량을 하여서 그 평균값을 대표치로 계산하였다. 차량 내부의 CO 농도는 자동 자료 입·출력장치가 내장된 운반 가능 자동 측정기(CMCD-10P, GASTEC Co.)를 사용하였고 측정프로그램에서는 매 3분 평균값을 관측하도록 조절되었다. 승용차와 버스 모두에서 CO 측정 높이는 지상 약 150 cm로 유지되었다.

### 2.3 측정자료의 정도 관리

PM10 측정자료의 정도관리(quality assurance and quality control, QA/QC)를 위해서 여과재는 채취 전 후에 항온·항습장치에 넣어서 24시간 보관 후 0.001 mg까지 칭량할 수 있는 전자미세저울로 무게를 칭량하였다. 이때 모든 칭량은 이틀간 하루에 한 번씩 모두 두 번을 칭량하여 두 여과재 무게의 평균을 대표값으로 사용하였다. 만약 두 번의 칭량시 무게 차이가 0.01 mg 이상일 때는 세 번째까지 칭량하고 이때의 값이 앞의 두 번 칭량한 평균의 0.01 mg 이내이면 이 세 번째 값을 사용하고, 이전 두 개 값 차이의 범위안에 들게 되면 세 번의 무게 값을 모두 평균하여 대표 값으로 하였다(Janssen *et al.*, 1998). 무게 측정 한계가 0.001 mg인 전자미세저울은 측정한계의 10배인 0.01 mg까지는 정확하게 측정할 수 있으므로 본 실험의 최저 공기채취량인 0.32 m<sup>3</sup>을 고려할 때 PM10의 정확도 한계농도는 31 µg/m<sup>3</sup>으로서 본 실험의 현장에서 측정된 최저농도인 43 µg/m<sup>3</sup>보다 낮게 나타났다. 한편, 이 중 시료 채취법(duplicate sampling method)을 이용하여 결정

된 본 연구의 측정법 정밀도는 상대표준편차값(relative standard deviation)으로서 15% 범위 내에 들었다.

CO 측정의 정도관리를 위해서 측정일마다 측정장치를 사용하기 전에 표준가스(span gas) 조정과 영점(zero point) 조정을 수행하였다. 전지를 이용하여 CO 측정장치를 측정 현장에서 작동시킬 때 야기될 수 있는 측정오차를 제거하기 위해서 이러한 CO 측정 정도관리를 위한 프로그램은 반드시 전기가 아닌 전지를 이용하여 실행되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 승용차와 시내버스 실내 농도 수준

승용차와 시내버스의 실내에서 측정된 PM10과 CO 농도를 요약하여 표 1에 나타내었다. 자동차 실내의 방향족 VOCs 농도와는 달리(Jo and Park, 1999a, b) 자동차 실내의 PM10과 CO 농도는 자동차 종류에 의존하지 않는 것으로 나타났다. 비모수 통계분석기법인 Wilcoxon test에 따르면 승용차와 시내버스 사이에 PM10과 CO 농도에 대한 통계적 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편, Jo and Park(1999a, b)의 연구에서는 방향족 VOCs 농도가 시내버스 보다 승용차 실내에서 통계적으로 높게 나타난 것으로 보고하였다. 본 연구와 이전 두 연구간의 결과 차이는 차량 내로 침투하는 오염물질들의 오염원 차이에 기인하는 것으로 추정된다. 승용차 실내 VOCs 농도의 경우, 주행 중 엔진에서 휘발 배출되는 방향족 VOCs와 도로상 공기 중 방향족 VOCs가 승용차 실내로 침투하는 복합적 작용에 영향을 받는 반면에 시내버스 실내 방향족 VOCs 농도는 시내버스의 연료가 방향족 VOCs를 함유하고 있지 않은 경유인 관계로 도로상 공기 중 방향족 VOCs만이 시내버스 실내로 침투한 결과로 설명되었다. 그러나, PM10과 CO는 방향족 VOCs와는 달리 자동차 엔진으로 부터는 배출되지 않고 배기구에서만 배출되기 때문에 PM10과 CO의 경우 승용차와 시내버스 모두가 하나의 동일한 주요 배출원인 도로상 공기오염도에 영향을 받는 것으로 추정된다. 더욱이, 승용차와 시내버스 모두에서 PM10과 CO의 상관관계가 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났고, 이 결과는 차량 실내 공기의 PM10과 CO 오

**Table 1. Summary of PM10( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and CO(ppm) concentrations inside passenger cars and public buses.**

Compound	Passenger car					Public bus				
	Min	Median	Max	Mean	S.D.	Min	Median	Max	Mean	S.D.
PM10	41	111	194	114	39	40	100	217	103	41
CO	0.8	2.5	7.8	2.9	1.5	0.7	2.4	4.5	2.6	0.8

\*Number of PM10 samples: N = 79 for Passenger car, N = 40 for Public bus; number of CO samples: N = 155 for Passenger car, N = 80 for Public bus

염이 동일 배출원 때문이라는 추정을 보조한다. 한편, CO의 경우 승용차와 시내버스 실내 모두에서 VOCs와 상관관계가 통계적으로 유의성이 있는 것으로 보고된 적이 있다(Jo and Park, 1998).

승용차와 시내버스 실내에서 측정된 PM10 농도는 다른 연구의 대기 중 농도보다 높게 나타났다. 본 연구에서 측정된 PM10 평균 농도는 승용차와 시내버스 실내에서 각각  $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었다. 한편, 최성우와 송형도(2000)은 본 연구와 동일한 지역인 대구에서의 연간 평균 농도가  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 되는 것으로 보고하였고, 김병화와 김동술(2000)은 수원지역의 평균 농도가  $69.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타내었으며, 유정석 등(1995)은 실험기간 중 서울 지역의 평균 농도가  $89.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 보고하였다. 더욱이, 나덕재와 이병규(2000)가 산업도시인 울산에서 지역의 특성에 따라 다섯 지역으로 구분하여 대기 중 PM10 농도를 측정된 결과 석유화학단지과 비철금속 산업지역에서  $99.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구의 시내버스 평균농도와 유사한 것으로 보고하였고, 그 외 네 개 지역의 평균 농도는  $32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $77.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  사이로서 본 연구의 차량 실내농도 보다 낮은 것으로 보고하였다. 따라서, 자동차 실내 PM10 농도를 측정된 본 연구 결과가 연간 대기환경기준인  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하며 대기 중 PM10 농도를 측정된 선진 연구들과의 결과 차이에 근거할 때 승용차와 시내버스가 PM10 노출에 주요한 미규모 환경(microenvironment) 중의 하나임을 시사된다. 또한, 본 연구에서 측정된 승용차와 시내버스 실내의 CO 평균 농도가 각각 2.9 ppm과 2.6 ppm으로서 우리나라 대기환경 8시간 기준농도인 9 ppm을 초과하지는 못하고 있지만, 최근의 대구 대기 중 평균 농도인 0.9 ppm을(김준동, 2000) 초과하기 때문에 PM10과 유사하게 승용차와 시내버스가 CO 노출에도 주요한 미규모 환경 중의 하나임을 시사한다.

승용차와 시내버스 실내에서 측정된 본 연구 결과

**Table 2. Mean in-vehicle concentrations of carbon monoxide(ppm) for the current study and other studies.**

Study area	In-auto	In-bus
Washington, DC <sup>a</sup>	11.5	6.0
Raleigh, NC <sup>b</sup>	11.3	NA
San Francisco, CA <sup>c</sup>	4.6	NA
New Jersey/New York <sup>d</sup>	3.0	NA
Central Paris <sup>e</sup>	12.0	4.0
Mexico City <sup>f</sup>	56.1	31.4
Taegu, Korea <sup>g</sup>	2.9	2.6

\*References: <sup>a</sup>Flachsbart *et al.* (1987); <sup>b</sup>Chan *et al.* (1991); <sup>c</sup>Ott *et al.* (1993); <sup>d</sup>Lawryk (1994); <sup>e</sup>Dor *et al.* (1995); <sup>f</sup>Fernandez-Bremauntz & Ashmore (1995); <sup>g</sup>this study

와 외국 연구 결과를 비교해 표 2에 나타내었다. 일산화탄소 농도는 대부분의 외국 연구 결과보다 훨씬 낮게 나타났다. 다만, 본 연구의 승용차 결과(평균 2.9 ppm)는 미국의 뉴욕/뉴저지의 승용차 연구결과(평균 3.0 ppm)와 매우 유사하게 나타났다. 외국 연구 결과 중에서도 멕시코 시티가 승용차와 버스 실내 농도가 각각 56.1 및 31.4 ppm으로서 가장 높게 나타났다. 그러나, 표 2에 나타난 외국의 연구결과는 현재 이용 가능한 자료이고 본 연구가 수행되는 시기에는 표 2에 예시된 대부분의 외국에서 자동차 배출 제어를 통한 일산화탄소의 관리가 이루어진 상태이므로 본 연구 결과와 직접적으로 비교될 수 없다는 한계가 있기 때문에 반드시 국내의 자동차 CO 오염이 외국보다 낮다고 장담할 수는 없고 장래 최신 외국자료가 발표될 때 다시 국내의 자료의 비교가 요구된다. 한편, PM10의 경우 본 연구의 승용차 결과(중앙값  $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 자동차 실내 오염 관련 유일한 외국자료인 Rodes *et al.* (1998) 결과(미국 캘리포니아 주의 Sacramento 및 Los Angeles의 각 중앙값 14 및  $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 훨씬 높게 나타났다.

**3.2 승용차 형태에 따른 실내 농도 수준**

표 3는 '연구 방법'에서 정의된 승용차의 크기와

**Table 3. Median PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and CO (ppm) concentrations inside passenger cars based on car size and model year.**

Compound	Small		Large	
	New	Old	New	Old
PM10	97	115	122	117
CO	2.2	2.4	2.5	2.6

\*Car size and model year are defined in the "Experimental methods" section: number of PM10 samples: N = 19 for Small-New, N = 20 for Small-Old, N = 20 for Large-New, N = 20 for Large-Old; number of CO samples: N = 39 for Small-New, N = 39 for Small-Old, N = 38 for Large-New, N = 39 for Large-Old

신구형 종류에 따라 승용차 실내 PM10과 CO 중앙값 농도를 나타낸다. 이원 선형모델 (two-way general linear model)을 이용한 통계적 분석 결과에 따르면 승용차의 크기와 신구형의 두 인자간에 교호효과 (interaction effect)는 없는 것으로 나타났고 이 모델과 Wilcoxon test를 이용한 집단 비교분석에서는 승용차의 크기 뿐만 아니라 신구형에 따른 승용차 실내 PM10과 CO 농도도 차이가 없는 것으로 나타났다. 소형 차량의 경우, 신형 차량에서 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.2 ppm이며, 구형 차량에서는 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.4 ppm으로 나타났다. 중대형 차량의 경우, 신형 차량에서 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.5 ppm이며, 구형 차량에서는 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.6 ppm으로 나타났다. PM10과 CO의 경우 도로상 공기오염도가 승용차 실내 농도에 주요 인자임을 고려할 때, 주행거리가 긴 구형 차량이 노후로 인하여 보다 많은 빈틈이 있고 이 때문에 보다 많은 양의 PM10과 CO가 구형차량으로 침투할 것으로 추정되기 때문에 신형 승용차에 비해 구형 승용차에서 높은 VOCs 농도를 보고한 Jo and Park (1999a)의 결과와는 달리, 본 연구 결과에서는 신형과 구형 승용차간의 농도 차이가 나타나지 않았다. 오히려 본 연구 결과는 주행노선과 차량 환기와 같은 다른 주행 인자와 기상 인자의 복합작용에 기인한 때문인 것으로 이해된다. 또한, 본 연구결과는 자동차 실내의 PM10과 CO를 포함한 여러 대기오염물질 농도가 차량의 종류에 따라 차이를 나타내지 않은 것으로 보고한 Rodes 등 (1998)의 연구결과와 일치한다.

**Table 4. Median CO (ppm) concentrations inside passenger cars and public buses based on commuting period.**

Compound	Passenger car		Public bus	
	Morning	Evening	Morning	Evening
CO	2.4	2.5	2.3	2.5

\*Number of samples: N = 77 for Passenger car-Morning, N = 78 for Passenger car-Evening, N = 40 for Public bus-Morning, N = 40 for Public bus-Evening

### 3.3 출퇴근 시기에 따른 자동차 실내 농도

출퇴근 시기에 따른 승용차와 시내버스 실내 CO 농도를 비교 평가하였다. 승용차와 시내버스 실내에서 측정된 CO 농도의 중앙값이 표 4에 나타나고 있으며, Wilcoxon test 결과는 승용차와 시내버스 모두에서 CO 농도가 오전 출근과 오후 퇴근 시간 간에 통계적인 유의성이 없는 것으로 나타났다. 승용차의 경우, 오전 출근과 오후 퇴근 시간대의 CO 중앙값 농도가 각각 2.4 ppm 및 2.5 ppm이며, 시내버스의 경우에는 오전 출근과 오후 퇴근 시간대의 CO 중앙값 농도가 각각 2.3 ppm 및 2.5 ppm으로 나타났다. 비록 본 연구와 Jo and Park (1998) 연구가 다른 실험 방법에 기초하여 수행되기는 하였지만, 출퇴근 시기가 차량 탑승시 CO에 대한 개인노출에 차이를 나타내지 않았다는 점에서 두 연구는 서로 일치하였다. 또한, Chan 등 (1991a)도 미국의 노스 캐롤리나 주 (North Carolina) 연구에서 동일한 결과를 얻었다. 본 연구는 실제 노선에 따른 실제상황의 출퇴근자들 노출 실험이 수행된 반면에 Jo and Park (1998) 연구에서는 대구지역에서 평상시에 교통혼잡이 가장 심한 도로 중의 하나로서 가상적인 노선을 선정하여 CO에 대한 차량 탑승 노출실험이 수행되었다. 따라서, 출퇴근 노선에 상관없이 출퇴근 시간이 차량 탑승자들의 CO에 대한 노출에 주요한 인자로 작용하는 것은 아닌 것으로 사료된다.

### 3.4 자동차 실내 농도 수준의 계절적 비교

승용차와 시내버스 실내의 PM10 및 CO 농도를 계절별로 비교 평가하였다. 표 5는 극단적인 온도차이를 나타내는 두 계절인 겨울과 여름 동안 측정된 승용차와 시내버스 실내의 PM10 및 CO의 중앙값 농도를 나타낸다. Wilcoxon test 결과는 승용차와 시

**Table 5. Median PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and CO (ppm) concentrations inside passenger cars and public buses based on season.**

Compound	Passenger cars			Public buses		
	Winter	Summer	Win/Sum	Winter	Summer	Win/Sum
PM10	124	90	1.4	122	78	1.6
CO	3.4	1.9	1.8	2.8	2.1	1.3

\*Car size and model year are defined in the "Experimental methods" section: number of PM10 samples: N = 39 for Passenger car-Winter, N = 40 for Passenger car-Summer, N = 20 for Public bus-Winter, N = 20 for Public bus-Summer; number of CO measurements: N = 77 for Passenger car-Winter, N = 78 for Passenger car-Summer, N = 40 for Public bus-Winter, N = 40 for Public bus-Summer

내버스 모두에서 PM10과 CO 농도가 겨울과 여름에 차이가 있는 것으로 나타났다 ( $p < 0.05$ ). 승용차의 경우, 겨울의 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 3.4 ppm이며, 여름에는 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 1.9 ppm으로서 여름에 대한 겨울의 PM10과 CO 중앙값 비율은 각각 1.4와 1.8로서 승용차 실내 PM10 및 CO 농도가 여름보다 겨울에 높게 나타났다. 버스의 경우, 겨울의 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.8 ppm이며, 여름에는 PM10과 CO 중앙값 농도가 각각  $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 2.1 ppm으로서 여름에 대한 겨울의 PM10과 CO 중앙값 비율은 각각 1.6와 1.3으로서 승용차와 동일하게 버스 실내 PM10 및 CO 농도가 여름보다 겨울에 높게 나타났다. 승용차와 시내버스 모두에서 나타난 이러한 차이는 PM10과 CO 모두가 연료의 불완전 연소시 배출되는 오염물질이기 때문에 여름보다 겨울에는 연료의 연소율이 떨어지므로 겨울에 자동차로부터 PM10과 CO의 배출량이 증가하게 되고, 여름보다 겨울에 도로상의 공기 중 PM10과 CO 농도는 높아질 수 있으며 이로 인해 여름보다 겨울에 보다 많은 PM10과 CO가 차량 실내로 침투할 수 있다. 이러한 설명은 자동차의 배기

가스 배출량은 찬 온도와 밀접한 관계를 가진다는 선진연구(Bruetsch's study, 1981)에 근거한다.

한편, 승용차와 시내버스 실내 PM10과 CO 농도가 여름보다 겨울에 높게 나타난 본 연구 결과는 Weisel 등 (1992)의 VOCs 연구결과와는 일치하지 않는다. Weisel 등 (1992)은 승용차의 실내 VOCs 농도가 겨울보다 여름에 높은 것으로 보고하였고, 이러한 결과는 여름철에 높은 온도로 인해 연료탱크와 엔진에서 휘발되는 양이 겨울철 보다 많은 때문으로 설명하였다. 앞서도 언급하였지만, VOCs의 경우 승용차 실내 오염도는 주행 중 엔진에서 휘발 배출되는 VOCs와 도로상 공기 중 VOCs가 승용차 실내로 침투하는 복합적 작용에 영향을 받는 반면에 PM10과 CO의 경우 승용차와 시내버스 모두가 하나의 동일한 주요 배출원인 도로상 공기오염도에 영향을 받는 것으로 추정된다. 따라서, Weisel 등 (1992)의 이론은 본 연구 결과 설명에 적용될 수 없으며, 본 연구 결과는 겨울의 낮은 연료 연소 효율로 인해 자동차 배기구를 통해서 보다 많은 PM10과 CO가 배출되어 이들 오염물질의 도로상 공기 중 오염도가 증가하였기 때문인 것으로 설명된다. 또한, PM10의 경우 광화학 반응에 의해서도 생성되기 때문에 여름과 겨울철의 도로상 공기의 광화학 반응성 차이도 본 연구 결과에 영향을 미쳤을 수도 있다.

**3.5 동시운행 승용차와 통근버스 실내농도 수준 비교**

대학 출퇴근버스를 이용하여 출퇴근할 경우와 승용차를 이용하여 출퇴근할 경우에 출퇴근자들의 PM10 및 CO 노출을 비교하기 위해서 승용차가 출퇴근버스를 뒤따를 때 두 차량에서 동시에 PM10과 CO의 농도가 측정되었다. 이에 대한 결과가 표 6에 나타난다. PM10의 경우 출퇴근버스 실내의 중앙값

**Table 6. Summary of PM10 and CO concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) inside passenger cars and University buses travelled in tandem.**

Compound	Passenger car					University bus				
	Min	Median	Max	Mean	S.D.	Min	Median	Max	Mean	S.D.
PM10	52	76	110	79	17	50	93	141	95	29
CO	1.9	2.4	4.0	2.5	0.6	1.5	2.2	3.0	2.3	0.5

\*Number of samples for each data set is 14

과 평균값이 각각  $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$  과  $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 승용차 실내의 중앙값 ( $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 평균값 ( $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 보다 각각 높게 나타났다. 그러나, Wilcoxon test 결과에 따르면 이러한 차이에는 통계적인 유의성이 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 다른 출퇴근 노선에서 다른 시간대에 운행된 승용차와 시내버스 실험에서 얻은 앞선 결과와 일치한다. 따라서, 앞선 연구 결과에 대한 설명과 마찬가지로 본 실험 결과는 승용차와 시내버스 모두가 하나의 동일한 주요 배출원인 도로상 공기의 PM10과 CO 오염도에 영향을 받은 때문으로 설명된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 운행 중 자동차 탑승자의 PM10과 CO 노출 평가를 위해서 가상적이 아닌 실제 출퇴근 노선 상에서 승용차를 이용하여 출퇴근하는 운전자들의 노출 평가, 시내버스를 이용하여 출퇴근하는 버스 탑승자들의 노출 평가, 그리고 동일한 주행 노선을 따라 동시에 운행되는 대학 출퇴근버스와 승용차의 출퇴근자 노출 평가가 수행되었다. 본 실험 조건에서 자동차의 형태(승용차와 시내버스 또는 대학 출퇴근버스)와 승용차의 형태(크기 및 신구형)는 출퇴근자들의 자동차 실내 PM10 및 CO 노출에 대하여 유의적인 영향을 나타내지 않았다. 자동차 형태에 대한 결과는 승용차와 시내버스 또는 대학 출퇴근버스가 모두가 하나의 동일한 주요 배출원인 도로상 공기 중 PM10과 CO 농도의 영향을 받은 때문인 것으로 사료된다. 한편, 출퇴근 노선에 상관없이 출퇴근 시간이 차량 탑승자들의 CO에 대한 노출에 주요한 인자로 작용하지 않는 것으로 나타났다.

그러나, 자동차 실내 PM10 및 CO 농도가 여름 보다 겨울에 높게 나타났기 때문에 다른 운행인자인 운행시기(겨울과 여름)가 출퇴근자들의 자동차 실내 PM10 및 CO 노출에 대하여 유의적인 영향이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 겨울의 낮은 연료 연소 효율로 인해 자동차 배기구를 통해서 보다 많은 PM10과 CO가 배출되어 이들 오염물질의 도로상 공기 중 오염도가 증가하였기 때문인 것으로 추정된다. 따라서, PM10 및 CO에 대한 개인노출 및

자동차 탑승과 관련한 노출로 인한 위해성 분석(risk analysis)을 수행할 때는 반드시 계절적인 인자가 고려되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-041-E00434).

#### 참 고 문 헌

- 김병화, 김동술(2000) 수원지역 대기 중 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16, 89-101.
- 김준동(2000) 대구·경북지역 5개 도시의 대기오염 특성, 경북대학교 산업대학원 석사학위 논문.
- 나덕재, 이병규(2000) 산업도시 대기 중 PM<sub>10</sub>의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구, 한국대기환경학회지, 16, 23-35.
- 백성욱, 송희봉, 신동찬, 홍성희, 장혁상(1998) 대구지역 공중위생법 규제대상시설의 실내공기 중 입자상 오염물질의 계절별 및 지점별 농도분포 특성, 한국대기환경학회지, 14, 163-175.
- 서영화, 이병수, 정용삼, 정영주, 문중화, 이길용, 심상권, 홍완, 최한우, 김기현(1999) PM10 채취와 PM10 조성물질의 실험실간 동시측정 비교 연구, 한국대기환경학회지, 15, 485-493.
- 유정석, 김동술, 김윤신(1995) 서울시 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 11, 279-290.
- 최성우, 송형도(2000) 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환경학회지, 16, 469-476.
- Bevan, M.A.J., C.J. Proctor, J. Baker-Roger, and N.D. Warren (1991) Exposure to carbon monoxide, respirable suspended particulates, volatile organic compounds while commuting by bicycle, Environ. Sci. Technol., 25, 788-791.
- Bruetsch, R.I. (1981) Carbon monoxide and non-FTP ambient temperature. Office of Mobile Source Air Pollution Control, U.S. Environmental Protection Agency, Ann Arbor, MI.
- Chan, C.C., H. Ozkaynak, J.D. Spengler, and L. Sheldon (1991a) Driver exposure to volatile organic compounds, CO, ozone, and NO<sub>2</sub> under different driv-



- ing conditions, *Environ. Sci. Technol.*, 25, 964-972.
- Chan, C.C., J.D. Spengler, H. Ozkaynak, and M. Lefkopoulou (1991b) *Commuter exposure to VOCs in Boston, Massachusetts*. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 41, 1594-1600.
- Chan, C.C., S.H. Lin, and G.R. Her (1993) Student's exposure to volatile organic compounds while commuting by motorcycle and bus in Taipei city, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 43, 1231-1238.
- Fernandez-Bremauntz, A.A. and M.R. Ashmore (1995) Exposure of commuters to carbon monoxide in Mexico city-I. Measurement of in-vehicle concentrations, *Atmos. Environ.*, 29, 525-532.
- Flachsbart, P.G. (1995) Long-term trends in United States highway emissions, ambient concentrations, and in-vehicle exposure to carbon monoxide in traffic, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 5, 473-495.
- Gertler, A.W., D.A. Lowenthal, and W.G. Coulombe (1995) PM10 source apportionment study in Bullhead city, Arizona, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 45, 75-82.
- Janssen, N.A.H., G. Hoek, H. Harssema, and B. Brunekreef (1998) Personal sampling of airborne particles: method performance and data quality, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 8, 31-43.
- Jo, W.K. and S.J. Choi (1996) Vehicle occupant exposure to aromatic volatile organic compounds in an urban and a suburban area in Korea, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 46, 749-754.
- Jo, W.K. and K.H. Park (1998) Exposure to carbon monoxide, methyl-tertiary butyl ether (MTBE), benzene while commuting along a Korean urban area, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 8, 159-171.
- Jo, W.K. and K.H. Park (1999a) Commuter exposure to volatile organic compounds under different driving conditions, *Atmos. Environ.*, 33, 409-417.
- Jo, W.K. and K.H. Park (1999b) Concentrations of volatile organic compounds in the passenger side and the back seat of automobiles, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 9, 217-227.
- Lawryk, N.J. (1994) *Automobile Commuter Exposures to Volatile Organic Compounds: Emissions, Malfunctions, and Policy*. Doctoral dissertation, Rutgers, The State University of New Jersey and Robert Wood Johnson Medical School, New Brunswick, NJ.
- Ott, W., P. Switzer, and N. Willitis (1993) Trends of in-vehicle CO exposures on a California arterial highway over one decade, Paper No. 93-RP-116B.04 presented at the 86th Annual Meeting of the Air and Waste Management Association, Denver, CO.
- Rodes, C., L. Sheldon, D. Whitaker, A. Clayton, K. Fitzgerald, J. Flanagan, F. DiGenova, S. Hering, and C. Frazier (1998) *Measuring Concentrations of Selected Air Pollutants Inside California Vehicles*. Final report, ARB Contract No. 95-339. California Air Resources Board, CA.
- SCAQMD (1989) *South Coast Air Quality Management District, in-vehicle characterization study in the south coast air basin*, Final Report, El Monte, CA, May, 1989.
- Wallace, L.A. (1987) *The TEAM Study: Summary and Analysis: Vol. I*. U.S. EPA, EPA 600/6-87/002a, NTIS PB 88-100060, Washington, DC.
- Weisel, C.P., N.J. Nicholas, and P.J. Lioy (1992) Exposure to emissions from gasoline within automobile cabins, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 2, 79-96.
- Williams, R., J. Creason, R. Zweidinger, R. Watts, L. Sheldon, and C. Shy (2000) Indoor, outdoor, and personal exposure monitoring of particulate air pollution: the Baltimore elderly epidemiology-exposure pilot study, *Atmos. Environ.*, 34, 4193-4204.
- Wixtrom, R.N. and S.L. Brown (1992) Individual and population exposures to gasoline, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 2, 23-78.