

실내 및 실외 공기중 이산화질소의 개인 노출량 측정을 위한 수동식 시료채취기의 성능평가

Evaluation of Passive Monitor for the Measuring of Personal Exposure to Nitrogen Dioxide in Indoor and Outdoor Air

양 원 호 · 이 기 영¹⁾ · 백 도 명

서울대학교 보건대학원 환경보건학과,

¹⁾미국 캘리포니아 데이비스 주립대학교 의과대학

(2000년 9월 6일 접수, 2000년 11월 16일 채택)

Won-Ho Yang, Ki-Young Lee¹⁾ and Do-Myoung Paek

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

¹⁾*School of Medicine University of California at Davis, California*

(Received 6 September 2000; accepted 16 November 2000)

Abstract

Practical devices for measuring personal exposure to nitrogen dioxide (NO₂) have been made for epidemiological studies of the health effects of air pollution. Standard methods for NO₂ measurement such as the chemiluminescent method and Saltzman method are not suitable for personal exposure because they are heavy, large and complicated to operate. In this study, a passive monitor was tested for the measurements of indoor and outdoor NO₂ level. Through a comparative analysis of data sets obtained by on-site chemiluminescence system, we assessed the accuracy and precision of NO₂ passive monitors. We also examined the possibility of passive monitor in the study of indoor, outdoor and personal NO₂ exposure. The accuracy and precision of NO₂ passive monitor were analyzed assuming measurements of on-site chemiluminescence system is reference value and using duplicated measurements, respectively. From these analysis, the NO₂ passive monitor was useful for measuring indoor, outdoor and personal exposure. And NO₂ level from on-site chemiluminescence system could not properly represent the personal NO₂ exposure as well as indoor and outdoor level of one's house. Personal exposures were correlated more strongly with indoor NO₂ concentrations than with outdoor NO₂ concentrations. Since activity pattern of each person is different, it was considered that personal daily behavior and life-style might prevent the air pollutant exposure.

Key words : nitrogen dioxide, passive monitor, personal exposure, accuracy, precision

1. 서 론

최근까지도 공기오염에 따른 건강영향(health effect)에 관한 환경역학(epidemiology) 연구에서는 실제적 개인노출 보다는 공공기관에서 측정하는 대기오염 고정측정소에서 자동감시체계(telemetry system)를 통해 전송된 자료를 이용하였다(Lee *et al.*, 1999). 하지만, 대부분의 사람들은 80% 이상을 실내에서 생활하기 때문에 공기오염과 연관된 개인노출 연구에서는 고정 대기오염 측정망의 오염물질 농도가 개인노출을 평가하는데 충분히 설명할 수 없는 경우가 많았다(Spengler *et al.*, 1994; Esmen, 1985). 특히 실내에서 발생될 수 있는 공기오염 물질 중 이산화질소(NO_2)의 개인노출은 실외 농도보다 실내 농도와 연관성을 갖고 있는 경우가 많았다(Levy *et al.*, 1998). 오존(O_3)은 실내에서 고전압을 사용하는 기기 등에서 발생될 수 있으나, 일반적으로 주택 실내의 발생원은 없으며 대부분 실외의 광화학스모그로 발생되기 때문에 개인노출과 건강영향은 실내 보단 실외 농도에 상관성을 가지고 있다(Lioy *et al.*, 1987).

NO_2 는 고온연소의 부산물로서 실외에서는 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스레인지, 케로센(kerosene) 난방기, 흡연 등과 같은 연소 과정에서 발생되며, 실내의 NO_2 농도는 공기환기량(air exchange rate)과 실내의 벽면 등에 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다(Sexton *et al.*, 1983). 실험실에서 조사된 NO_2 의 생체실험에 의하면 NO_2 는 호흡기와 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 보고되었다(WHO, 1997).

환경 위해성평가(risk assessment)에서 연구자들은 직접적으로 개인 시료채취기를 이용하여 개인노출을 측정·평가하고 있다. 개인의 NO_2 총 노출(total exposure)은 매일의 일상적 활동에서 각 장소에서 측정된 오염농도와 각 장소에서 보내진 시간을 가중치 모델에 적용하여 예측할 수 있다(Yang *et al.*, 2000). 공기오염물질의 개인노출 측정에는 호흡기 근처의 측정과 실제 사람에게 호흡되는 정도, 오염물질 노출방법, 농도, 실외시간 동안의 측정 등 많은 기술적 문제들이 있다. 그럼에도 불구하고 위해성평가에서 필수적으로 요구되는 것이 노출평가(exposure assessment)이며, 정확한 노출량을 측정하기 위해 개인

시료채취기가 필수적이다(Nielson *et al.*, 1997). 공기를 포집하기 위해서 펌프가 요구되는 개인 시료채취기는 일반 활동상태에서 공기중의 오염물질 농도를 단기간 동안 측정할 수 있지만, 펌프는 무겁고 크며, 작동하기도 쉽지 않다. 반면에, 펌프를 사용하지 않고 확산과 투과의 원리를 이용한 수동식 시료채취기(passive monitor)는 개인노출 측정에 적절하게 작고 무겁지 않으며 펌프를 사용하지 않기 때문에 계속적으로 연구되어 왔다(Rose and Perkins, 1982). 또한 같은 시간대에 장소가 다른 곳 또는 많은 사람들의 개인노출을 동시에 측정할 수 있는 비용적 장점을 가지고 있다. 주로 실외에 발생원을 가지고 있는 아황산가스(SO_2)와 오존(O_3)의 농도측정에 이용되는 수동식 시료채취기는 반응성이 강하고 간섭물질이 존재하기 때문에 최근까지도 계속적으로 연구되어 왔지만 기술적인 문제로 개인노출 평가에 제한점을 가지고 있다(Liard *et al.*, 1999; Leaderer *et al.*, 1994). NO_2 는 실외 및 실내에서 발생원을 가지고 있으며, 일반 대기 NO_2 농도(대략 40 ppb)의 1,000배 이상의 고농도 이산화탄소(CO_2) 외에는 반응성이 없는 triethanolamine을 이용하여 बै지모양(badge-type)의 수동식 시료채취기가 개인노출, 실내 및 실외 농도 측정에 많이 이용되고 있다(Yanagisawa and Nishimura, 1982). Lee *et al.* (1992)의 연구에 의하면 NO_2 수동식 시료채취기는 바람에 가장 큰 영향을 받으며 참값(true value)의 최대 20% 정도의 오차를 야기시킬 수 있는 것으로 보고되었다. NO_2 수동식 시료채취기의 이런 단점에도 불구하고 사용의 편리함과 분석의 간편성으로 개인노출 및 실내와 실외 농도 측정에 계속 이용되고 있다.

이 연구의 목적은 실내, 실외의 이산화질소 농도 측정과 개인노출에 이용되는 수동식 시료채취기와 화학발광법을 이용한 대기오염 측정망에서 동시에 측정하여 수동식 시료채취기의 정확도 및 정밀도를 분석하였다. 그리고 본 연구진에 의해 수행된 연구의 NO_2 실측 자료를 이용·분석하여 수동식 시료채취기의 이용 가능성과 수동식 시료채취기의 성능 평가를 하였다.

2. 재료 및 방법

수동식 시료채취기의 정확도(accuracy)와 정밀도

(precision)를 평가하기 위하여 2000년 7월 15부터 23일까지 서울시 대기오염 고정 측정망인 이화, 남가좌 1동, 불광 측정소의 화학발광법을 이용한 NO₂ 직독기 근처에 수동식 시료채취기를 2개씩 설치하였다. 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 이용하여 확산(diffusion)과 투과(infiltration)라는 물리적인 과정과 반응에 의한 화학적 반응을 이용하여 실내와 실외의 NO₂ 농도를 측정하는 장치이다. 수동식 시료채취기는 작으며 (5×4×1 cm) 가벼운 장점을 지니고 있다 (15 g). 수동식 시료채취기 내부에 있는 셀룰로오즈 필터에 triethanolamine 용액이 흡수되어 NO₂를 포집한다. 농도계산에 이용된 물질전환계수 (mass transfer coefficient)는 0.10 cm/sec를 이용하였으며, NO₂의 농도분석은 photo-spectrometer (Shimadzu UV-1201)를 이용하여 정량분석을 하였다 (Lee *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1992).

평일의 화·수요일, 목·금요일과 주말의 토·일요일 각 2일 동안 측정하여 고정측정소의 직독기 농도값을 기준값 (reference)으로 가정하고 비교하였다. 그리고, 도로에서 약 100 m 거리에 위치한 이화동 측정소에서 거리가 약 800 m 떨어진 지역의 사무실의 실내 및 실외, 약 500 m와 1,000 m 떨어진 주택의 실내 및 실외에 수동식 시료채취기를 설치하여 비교하였다. 또한 각 주택에 거주하는 주민 한 명씩 개인노출을 같은 시간동안 측정하였다. 정확도는 직독기의 농도값을 기준으로 측정소에서 측정된 농도값에서 수동식 시료채취기로 2개씩 측정된 평균측정 농도값을 뺀 절대값에 고정측정값으로 나누어 계산하였다. 정밀도는 한 장소에서 수동식 시료채취기 간의 표준편차와 중복측정 (duplicate measurement)의 상관성을 이용하여 분석하였다.

본 연구진에 의해 수행된 한 연구는 1999년 4월부터 6월까지 호주 브리즈베인 (Brisbane)의 위치하는 29주택에서 4주 동안 매일 연속적으로 이산화질소의 농도를 수동식 시료채취기를 사용하여 측정한다. 데이터를 이용하여 정밀도 분석을 하였다 (양원호 등, 2000). 측정동안 매주 각 수요일마다 실내 및 실외에 수동식 시료채취기를 각각 2개씩 설치하여 이중측정을 하였다. 또 다른 연구는 1997년 2월 여천공단지역에서 주민 50명을 선정하여 연구원들이 매일 환자의 가정을 방문하여 NO₂ 수동식 시료채취기를 전달 수거하여, 2주 동안 연속적으로 매일 측정된 개인노출 자료를 이용하였다 (국립환경연구원, 1997).

3. 결과 및 고찰

3.1 NO₂ 수동식 시료채취기의 정확도 및 정밀도

이산화질소 수동식 시료채취기 2개를 각 이화동, 남가좌 1동, 불광동의 대기오염 측정망의 측정기 흡입구간 바로 옆에 설치하였다. 설치된 2개의 시료채취기 사이는 약 10~20 cm 정도의 거리를 유지하였다. 고정측정소에서 측정된 자료는 1시간 평균치로 수동식 시료채취기 측정시간과 동일한 시간을 평균하여 표 1에 나타내었다. 정확도는 고정측정값에서 수동식 시료채취기의 측정값을 뺀 절대값에 고정측정값으로 나누어 계산하였다. 불광동의 평일 2일 측정값은 측정기의 고장으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 불광동 평일 측정치를 제외한 모든 수동식 시료채취기의 측정값이 고정측정소의 측정값 보다 높은 값을 나타내었다. 불광동의 평일 측정값을 제외

Table 1. Accuracy (%) between on-site chemiluminescence monitors and passive monitor levels. (Unit: ppb)

	Yehwa-Dong			Namgaza 1-Dong			Bulkwang-Dong		
	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)
Chemiluminescence measurement on site monitor	43.4	37.2	34.6	35.7	29.9	32.3	N.D.	N.D.	31.5
Passive monitor	47.1 (±1.2)	39.0 (±2.1)	38.3 (±0.7)	40.2 (±0.8)	32.2 (±0.7)	33.3 (±0.6)	37.1 (±0.3)	38.1 (±0.5)	34.1 (±1.6)
Accuracy of passive monitor (%)	8.5	4.8	10.7	12.6	7.7	3.1	N.A.	N.A.	8.3

N.D.: not detected
N.A.: not applicable

한 정확도의 평균값은 약 7.9%로 수동식 시료채취기의 측정값이 과장된 측정값을 나타낼 수 있는 것으로 나타났다 (Berglund *et al.*, 1992). 고정측정소의 위치가 보통 3~4층 건물의 옥상에 설치가 되어있으며 기류의 속도가 높은 것을 고려할 때, 고정측정소의 측정값보다 높은 값을 나타낸 것으로 생각된다 (Treitman *et al.*, 1990).

불광동 평일의 측정값을 제외한 고정측정소의 측정값과 수동식 시료채취기의 측정값 사이의 상관관계를 그림 1에 나타내었다. 두 측정값 사이의 Pearson 상관계수는 0.97이었으며 통계학적으로 유의하였다 ($p < 0.001$).

3.2 중복측정을 이용한 정밀도 분석

호주 브리스베인서 수행된 연구의 중복측정된 측정값을 이용하여 수동식 시료채취기의 상대정밀도를 분석하였다. 매주 수요일마다 실행된 이중측정의

상대정밀도는 각 이중측정의 절대 차이의 표준편차를 총 평균농도로 나누어 계산하였다. NO₂의 실내·외 측정은 모든 수동식 시료채취기에서 8.5%의 상대정밀도를 보였다. 실내 및 실외의 측정 장소에 따른 정밀도는 실내에서 7.1%와 실외에서 11.3%를 나타내었다. 이중측정에서 실내 및 실외의 평균 농도 및 표준편차와 상대정밀도를 표 2에 나타내었다. 실내에서 이중측정된 수동식 시료채취기간의 상관계수는 0.98 ($r = 0.98$)이었으며, 실외의 상관계수는 0.96 ($r = 0.96$)였다 (그림 2, 3). 본 연구의 결과는 수동식 시료채취기의 높은 정밀도를 나타낼 수 있는 값으로 여겨질 수 있었다. 실외 보단 실내에서 높은 정밀도를 보였으며, 이것은 확산과 투과의 원리를 이용한 수동식 시료채취기는 바람 속도의 영향을 많이 받기 때문에 실외 측정의 정밀도 상대적으로 실내보다 낮았다. Matthews *et al.* (1987) 등의 연구에 의하면 일반 주택의 평균 실내 속도는 0.07 m/sec이었으며, 상대적으로 실외의 바람속도는

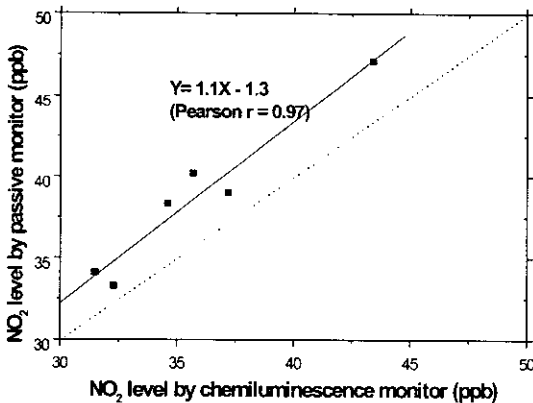


Fig. 1. Correlation between NO₂ measurements with passive monitors and on-site chemiluminescence monitors.

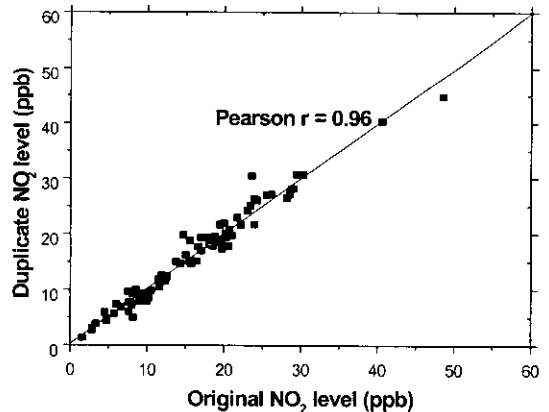


Fig. 2. Relation between original NO₂ measurements and duplicate NO₂ measurements in outdoor ($n = 88$).

Table 2. Relative standard deviations (RSD) and correlation coefficients between original and duplicate measurements in indoor and outdoor.

	Mean (\pm STD)		Total mean both original and duplicate (1)	Absolute difference between original and duplicate (2)	RSD (%) $<(1)/(2)>$	Correlation coefficient (r)
	Original (ppb)	Duplicate (ppb)				
Indoor level ($n = 90$)	11.72 (± 7.15)	11.63 (± 6.99)	11.7	0.83	7.1	0.98
Outdoor level ($n = 88$)	15.85 (± 8.82)	16.01 (± 8.90)	15.9	1.80	11.3	0.96

실내보다는 높다.

3.3 개인노출의 실내 및 실외의 상관성

이화동 대기측정망의 흡입구간 바로 옆에서 NO₂ 수동식 시료채취기를 2개 설치하고, 동시에 측정소 위치에서 약 800 m 떨어진 사무실 실내 및 실외, 약 500 m와 1,000 m 떨어진 일반주택의 실내 및 실외의 농도를 측정하였다. 또한 그 주택에 거주하며 같

은 사무실에서 근무하는 두 사람을 선정하여 동시에 개인노출을 평일과 주말의 측정된 결과를 표 3에 나타내었다. 대기측정망과 흡입구간에서 수동식 시료채취기로 측정된 NO₂ 농도값은 주중에는 47.1 ppb, 43.4 ppb, 주말은 38.3 ppb, 34.6 ppb로 나타났으나 개인노출의 경우 주중에 각각 28.5 ppb, 30.2 ppb, 주말에 각각 22.8 ppb, 28.1 ppb로 개인노출 수준은 상당히 낮은 값을 나타내었다. 따라서 고정 측정망에서 측정된 농도는 측정소에서 일정거리에 있는 실외 및 실내 농도 뿐만 아니라 개인노출을 적절히 나타낼 수 없었다. 평일의 실내·외와 대기측정망의 NO₂ 농도값은 주말에 비해서 상대적으로 높았으며 이결과는 주말의 도로 차량의 감소 때문일 것으로 사료된다.

본 연구진의 수행된 연구결과에 의한 호주 브리스베인의 직장인(공무원) 57명의 시간활동도(time activity)와 한국 서울의 직장인(공무원) 98명의 시간활동도를 비교하여 표 4에 나타내었다(Yang *et al.*, 2000). 지역적 차이는 있지만 직장인은 대부분의 시간(80% 이상)을 주택과 사무실 등의 실내에서 보내기 때문에 NO₂ 오염물질의 개인노출은 실외공기 보단 실내공기와 연관이 있었다(Lee *et al.*, 2000). 고정측정소의 NO₂ 농도측정이 개인노출을 대표할

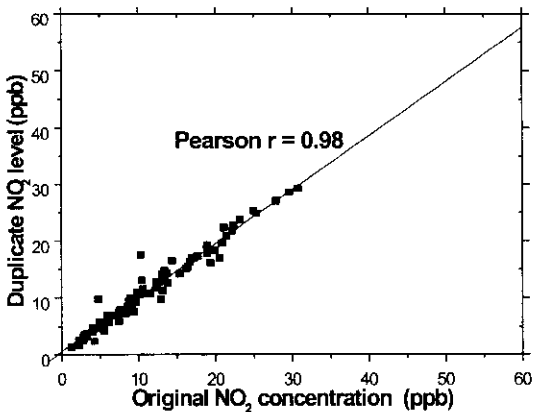


Fig. 3. Relation between original NO₂ measurements and duplicate NO₂ measurements in indoor (n = 90).

Table 3. Comparison of NO₂ concentrations.

(Unit: ppb)

	Passive monitor (On-site chemiluminescence monitor)	Office located at 800 m from On-site chemiluminescence monitor	Personal (1)	Person (1)'s house located at 500 m from	Personal (2)	Person (2)'s house located at 1,000 m from
Weekday (2days)	47.1 (43.4)	Indoor 22.7 (±0.3) Outdoor 30.0 (±1.3)	28.5	Indoor 23.8 (±0.4) Outdoor 32.3 (±1.5)	30.2	Indoor 25.7 (±0.5) Outdoor 34.1 (±0.9)
Weekend (2days)	38.3 (34.6)	Indoor 10.2 (±0.1) Outdoor 32.8 (±0.7)	22.8	Indoor 22.7 (±0.2) Outdoor 31.9 (±1.4)	28.1	Indoor 26.7 (±0.9) Outdoor 34.2 (±0.7)

Table 4. Fraction of time in indoor, outdoor, and travel in Brisbane, Australia and Seoul, Korea.

		Indoor			Outdoor			Travel
		Home	Office	Other	Near home	Near office	Other	
Brisbane, Australia (57 workers)	Total hours	757.2	403.4	65.6	15.3	27.8	15.0	105
	Mean hours	13.3	7.1	1.2	0.3	0.5	0.3	1.9
	%	54.5	29.1	4.7	1.1	2.0	1.0	7.6
	Total %			88.3		4.1		7.6
Seoul, Korea (98 workers)	Total hours	1,141.5	717.0	79.6	47.3	122.2	58.5	154.8
	Mean hours	11.8	7.4	0.8	0.5	1.3	0.6	1.3
	%	49.2	30.9	3.4	2.0	5.3	2.5	6.7
	Total %			83.5		9.8		6.7

수 없는 것으로 생각된다.

3.4 여천지역의 이산화질소 개인노출 측정

여천지역에서 수동식 시료채취기를 이용하여 측정된 NO₂의 개인노출은 연속적으로 매일 2주 동안 측정되었다. 사람의 생활주기를 일주일 단위로 보고 각 주의 월요일부터 금요일까지 비슷한 생활행태를 한다고 가정하여 첫 번째 주(월요일부터 금요일까지)와 두 번째 주(월요일부터 금요일까지)의 NO₂ 농도를 짝비교(paired t-test)를 하였다. 비슷한 가정을 하여 수행된 Liard *et al.* (1999)의 연구는 Pearson 상관계수의 값은 0.70이었으나, 본 연구의 결과는 -0.05(±0.4)를 나타내었다. Liard *et al.* (1999)의 연구대상이 사무실 근로자임을 감안할 때, 사무실 근로자가 아닌 일반주민의 활동도는 매일 다를 수 있기 때문에 다른 결과가 나타난 것으로 생각된다. 사람의 활동행태(behavior)가 공기오염물질 노출에 영향을 끼칠 수 있으며 더불어 공기오염 노출 예방(prevention)을 할 수 있을 것으로 고려되었다.

4. 결 론

실내 및 실외의 이산화질소 농도 측정과 개인노출에 이용되는 이산화질소 수동식 시료채취기의 정확도 및 정밀도를 분석하였다. 그리고 본 연구진이 참여한 연구의 NO₂ 실측 자료를 이용·분석하여 수동식 시료채취기의 실내, 실외 및 개인노출의 이용 가능성을 연구하였다. 수동식 시료채취기는 실내·실외 및 개인노출 측정에 유용한 것으로 결론 지을 수 있었다.

1) 모든 수동식 시료채취기의 측정값이 고정측정소의 측정값 보다 높은 값을 나타내었다. 불광동의 평일 측정값을 제외한 정확도의 평균값은 약 7.9%로 수동식 시료채취기의 측정값이 과장된 측정값을 나타내었으나, 고정측정소의 측정값과 수동식 시료채취기의 측정값 사이의 Pearson 상관계수는 0.97였으며 통계학적으로 유의한 차이는 없었다($p < 0.001$).

2) 실내에서 중복측정된 수동식 시료채취기간의 상관계수는 0.98($r=0.98$)이었으며, 실외의 상관계수는 0.96($r=0.96$)이었다. 비교적 높은 정밀도를 보였으며 실외 보단 기류의 변화가 적은 실내에서 높은 정밀도를 보였다.

3) 고정측정소 위치에서 약 800 m 떨어진 사무실 실내 및 실외, 약 500 m와 1,000 m 떨어진 일반주택의 실내 및 실외의 농도를 측정하였다. 또한 그 주택에 거주하며 사무실에서 근무하는 한 사람씩 선정하여 동시에 개인노출을 측정한 결과에 의하면 고정측정소에서 측정된 NO₂ 농도는 측정소에서 일정 거리에 있는 실외 및 실내 농도 뿐만 아니라 개인노출을 적절히 나타낼 수 없었다.

4) 연속적으로 매일 2주 동안 측정된 NO₂의 농도 자료를 사람의 생활주기를 일주일 단위로 보고 각 주의 월요일부터 금요일까지 비슷한 생활행태를 한다고 가정하여, 첫 번째 주(월요일부터 금요일까지)와 두 번째 주(월요일부터 금요일까지)의 NO₂ 농도를 짝비교(paired t-test)를 하였다. Pearson 상관계수의 값은 -0.05(±0.4)였으며, 직장인이 아닌 일반주민의 활동도가 매일 다를 수 있기 때문에 다른 결과가 나타난 것으로 생각되며, 생활활동 행태가 공기오염 노출예방을 할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 환경부에서 주관하는 G7 “환경오염물질의 인체 노출지표를 이용한 건강영향 예측기법 개발”의 연구비 지원으로 수행된 연구중의 일부이며, 연구비를 지원하여 준 환경부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (1997) 환경오염으로 인한 여천지역 주민 건강영향에 대한 역학조사, 연구용역보고서
- 양원호, 이기영, 정문호, 정문식 (2000) 이산화질소 다중측정을 이용한 실내공기의 환기량 및 발생량 추정에 관한 연구, 한국산업위생학회지, 10(1), 160-169.
- Berglund, M., M. Vahter, and G. Bylin (1992) Measurement of Personal Exposure to NO₂ in Sweden-Evaluation of a Passive Sampler, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2(3), 295-307.
- Environmental Health Criteria 188 (1997) Nitrogen Oxides (Second Edition), WHO, Geneva.
- Esmen, N.A. (1985) The status of Indoor Air Pollution, *Environmental Health Perspectives*, 62, 259-265.
- Leaderer, B.P., P. Koutrakis, J.M. Wolfson, and J.R. Sullivan

- (1994) Development and Evaluation of a Passive Sampler to Collect Nitrous Acid and Sulfur Dioxide, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 4(4), 503-511.
- Lee, J.T., D.C. Shin, and Y. Chung (1999) Air Pollution and Daily Mortality in Seoul and Ulsan, Korea, *Environmental Health Perspectives*, 107(2), 149-154.
- Lee, K., Y. Yanagisawa, J.D. Spengler, and I.H. Billick (1992) Wind Velocity Effects of Sampling Rate of NO₂ Badge, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2, 207-219.
- Lee, K., Y. Yanagisawa, J.D. Spengler, H. Ozkaynak, and I. H. Billick (1993) Sampling Rate Evaluation for NO₂ badge: (I) in Indoor Environment, *Indoor Air*, 3(2), 124-130.
- Lee, K., W.H. Yang, and N.D. Bofinger (2000) Impact of Microenvironmental Nitrogen Dioxide Concentrations on Personal Exposures in Australia, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50, 1739-1744.
- Levy, J.I. et al. (1998) Impact of Residential Nitrogen Dioxide Exposure on Personal Exposure: An International Study, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48, 553-560.
- Liard, R., M. Zureik, Y.L. Moullec, D. Soussan, M. Glorian, A. Grimfeld, and F. Neukirch (1999) Use of Personal Passive Samplers for Measurement of NO₂, NO, and O₃ Levels in Panel Studies, *Environmental Research, Section A* (81), 339-348.
- Lioy, P.J., D. Spector, G. Thurston, K. Citak, M. Lippman, N. Bock, F.E. Speizer, and C. Hayes (1987) C. The Design Considerations for Ozone and Acid Aerosol Exposure and Health Investigations: The Fairview Lake Summer Camp-Photochemical Smog Case Study, *Environment International*, 13, 271-283.
- Matthews, T.G., C.V. Thompson, D.L. Wilson, A.R. Hawthorne, and D.T. Mage (1987) Air Velocities Inside Domestic Environments: An Important Parameter for Passive Sampler Monitoring, The 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Berlin, West Germany.
- Nielson, O.R., H. Skov, C. Lohse, B.L. Thomas, and J.H. Olsen (1997) Front-door Concentrations and Personal Exposures of Danish Children to Nitrogen Dioxide, *Environmental Health Perspectives*, 105(9), 964-970.
- Rose, V.E. and J.L. Perkins (1982) Passive Dosimetry-State of the Art Review, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 43(8), 605-621.
- Sexton, K., R. Letz, and J.D. Spengler (1983) Estimating Human Exposure to Nitrogen Dioxide: An Indoor/Outdoor Modeling Approach, *Environmental Research*, 32, 151-166.
- Spengler, J.D., M. Schwab, P.B. Ryan, S. Colome, A.L. Wilson, I.H. Billick, and E.J. Becker (1994) Personal Exposure to Nitrogen-Dioxide in the Los-Angeles Basin, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 39-47.
- Treitman, R.D., P.B. Ryan, D.P. Harlos, M.L. Soczek, Y. Yanagisawa, J.D. Spengler, and I.H. Billick (1990) Sampling and Analysis of Nitrogen Dioxide and Respirable Particles in the Indoor Environment, Monitoring Methods for Toxics in the Atmosphere, ASTM STP 1052, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 197-212.
- Yang, W.H., K.Y. Lee, H.S. Son, and M.H. Chung (2000) Estimation of Personal Exposure on Nitrogen Dioxide Using Time Activity-Comparative study between Seoul, Korea and Brisbane, Australia-, *대한위생학회지*, 15(2), 10-17.
- Yanagisawa, Y. and H. Nishimura (1982) A Badge-type Personal Sampler for Measurement of Personal Exposures to NO₂ and NO in Ambient Air. *Environment International*, 8, 235-242.