

**수동식 시료채취기를 이용한 사무실 직장인의
이산화질소 노출평가 및 예측
- 한국의 서울과 호주의 브리스베인 비교 연구 -**

양 원 호 · 손 부 순 · 김 중 오*
서울대학교 보건대학원 환경보건학과 · 순천향대학교 환경보건학과
*동남보건대학 환경위생과
(2001년 10월 6일 접수; 2002년 3월 13일 채택)

**Exposure Assessment and Estimation of Nitrogen
Dioxide on Office Worker Using Passive Monitor
- Comparative Study of Seoul in Korea and Brisbane in Australia -**

Won-Ho Yang, Bu-Soon Son* and Jong-Oh Kim**

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University and E&B Korea Ltd., Seoul 110-799, Korea,

**Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Choongchungnam-do 336-745, Korea,*

***Department of Environmental Sanitation, Dongnam Health College, Kyonggi-do 440-714, Korea,*

(Manuscript received 6 October, 2001; accepted 13 March, 2002)

Indoor and outdoor nitrogen dioxide (NO₂) concentrations were measured and compared with measurements of personal exposures of 95 persons in Seoul, Korea and 57 persons in Brisbane, Australia, respectively. Time activity diary was used to determine the impact on NO₂ exposure assessment and microenvironmental model to estimate the personal NO₂ exposure. Most people both Seoul and Brisbane spent their times more than 90% of indoor and more than 50% in home, respectively. Personal NO₂ exposures were significantly associated with indoor NO₂ levels with Pearson coefficient of 0.70 ($p < 0.01$) and outdoor NO₂ levels with Pearson coefficient of 0.66 ($p < 0.01$) in Seoul and of 0.51 ($p < 0.01$) and of 0.33 ($p < 0.05$) in Brisbane, respectively. Using microenvironmental model by time weighted average model, personal NO₂ exposures were estimated with NO₂ measurements in indoor home, indoor office and outdoor home. Estimated NO₂ measurements were significantly correlated with measured personal exposures ($r = 0.69$, $p < 0.001$) in Seoul and in Brisbane ($r = 0.66$, $p < 0.001$), respectively. Difference between measured and estimated NO₂ exposures by multiple regression analysis was explained that NO₂ levels in near workplace and other outdoors in Seoul ($p = 0.023$), and in transportation in Brisbane ($p = 0.019$) affected the personal NO₂ exposures.

Key words : Passive monitor, Exposure, Nitrogen dioxide, Monte-Carlo simulation

1. 서 론

인간은 태어나서 사망할 때까지 환경의 여러 요인과 상호작용을 하면서 살아간다. 따라서 인간건강은 그러한 요인들에 의해 영향을 받게 되므로 원인 인자의 위해 가능성과 정도를 결정하는 것은 환경보건학적 측면에서 매우 중요하다.¹⁾ 그러나, 환경

Corresponding Author : Won-Ho Yang, Dept. of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University, Seoul 110-799, Korea
Phone : +82-2-740-8881
E-mail : yangwonho@hotmail.com

요인과 건강장애를 평가하는 데는 다른 복합적인 요인들이 존재하기 때문에 상관성을 밝히는데 많은 어려움이 있다. 이런 환경요인에 따른 건강장애의 영향을 밝히는 것은 어려움이 많지만, 대기오염과 노약자들의 천식 및 병약자들의 초과 사망에 대한 런던 스모그(smog)의 조사연구 이후 전세계적으로 대기오염으로 건강장애에 관해 많은 연구가 진행되었다.²⁻⁴⁾

현대 생활에서 사람들은 대부분의 시간을 실내(주택, 사무실, 실내작업장, 지하상가, 자동차, 지하철 등)에서 생활하기 때문에 실내공기질(indoor air quality)은 개인의 공기오염물질에 노출되는 주요한 인자이며, 따라서 공기오염과 건강장애의 관련성을 파악하는데 중요 요인일 가능성이 있다.⁵⁾ 특히, 어떤 공기오염 물질들은 실외보다 실내에서 높기 때문에 더 큰 건강 위해를 줄 가능성이 있다.⁶⁾

노출은 오염물질과 인간 사이의 접촉으로 정의되며, 노출평가는 평가대상 물질에 대한 개인이나 집단의 환경 중 노출강도, 빈도 및 기간을 측정 또는 평가하는 과정이다.⁷⁾ 노출평가는 위해성평가의 필수적 전제조건으로, 효과적인 위해성 관리를 위해서는 정확한 노출평가가 요구된다. 공기오염물질의 노출정도는 직접적 또는 간접적으로 결정될 수 있다. 직접적인 방법으로 개인의 호흡기 근처에서 측정하는 방법과 생체지수(biomarkers)를 이용할 수 있으며, 간접적인 방법으로는 실내 및 실외 공기농도를 측정하여 이용한다.⁸⁾

공기오염물질의 농도, 노출시간, 노출빈도의 변수들은 인간의 시간대별 활동에 영향을 받으며, 개인의 총 노출은 수학적 모델 같은 간접적 방법을 이용하여 예측될 수도 있다.^{9,10)} 이런 간접적 접근 방법도 또한 활동 행태에 따른 시간 자료를 요구한다. 이와 같이, 개인 또는 집단의 시간대별 활동은 환경으로 유입된 공기오염물질에 접촉되기 전까지는 개인 또는 집단에게 위해를 일으킬 수 없기 때문에 잠재적 노출의 중요한 결정사항이다.¹¹⁾

최근 국내에서도 일반 시민들을 대상으로 하루 중 시간대별 활동 행태에 관한 연구가 수행되었다.¹²⁾ 개인의 시간대별 활동 행태 및 범위는 직업, 취미, 문화, 장소, 성, 연령과 개인 성향에 따라 변할 것이며, 교육정도와 사회경제적 지위도 또한 영향을 줄 것이다. 하지만, 개인 또는 집단의 시간대별 활동 행태는 공기오염물질에 고노출(high exposure) 또는 저노출(low exposure) 될 수 있기 때문에 중요하다. 따라서, 개인 또는 집단의 시간별 활동과 공기오염물질 농도가 조합될 때, 노출의 빈도 분포를 제공할 수 있다.¹³⁾ 또한 몬테칼로 모의실험

(Monte-Carlo simulation)은 가능한 상황을 확률분포로 가정하여 이들 분포를 이루는 자료들이 예측 모델에서 계산되어 특정분포로 개인노출을 예측할 수도 있다.¹⁴⁾

본 연구의 목적은 한국 서울시의 Y구청 직원과 호주 브리스베인시의 시청 직원을 대상으로 공기오염물질과 연관된 노출평가지 중요한 요인인 시간대별 활동 범위 및 행태를 조사하였다. 동시에 참여자들을 대상으로 NO₂ 개인노출, 참여자 개인주택의 실내 및 실외의 NO₂ 농도를 측정하여 개인노출에 영향을 주는 주된 요인을 분석하였다. 그리고, 시간대별 활동과 측정된 NO₂ 농도를 시간가중 평균모델에 적용하여 개인의 NO₂ 노출을 예측하였다.¹⁵⁻¹⁷⁾

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

서울에서 연구기간은 1999년 10월 21일(목요일)부터 2일 동안 이었으며, 조사대상은 서울 Y구청의 직원 95명에게 시간활동표(time-activity diary)와 NO₂ 수동식 시료채취기를 직접 설명하며 배포했고 우편으로 수거하였다. 브리스베인에서는 1999년 6월 16일(수요일)부터 2일 동안 실시하였다. 조사대상은 브리스베인 시청에 근무하는 직원 57명에게 같은 방법으로 시간활동표와 NO₂ 수동식 시료채취기를 직접 설명하며 배포했고 측정기를 직접 수거하였다. 시간활동표는 오전 6시(06:00)부터 오후 12시(24:00)까지는 30분 단위로 표시(√)하고, 오후 12시부터 오전 6까지는 1시간 단위로 표시(√)하였다. 시간활동표에서는 실내는 모든 집, 상점, 또는 백화점 등의 실내공간을 의미하였으며, 실외는 실외공간을 의미하였다. 실내에는 집, 사무실, 실내의 다른 공간 3부분으로 나누어 표시하도록 하였으며, 실외는 집근처, 사무실 근처, 실외의 다른 장소 3부분으로 나누었다. 또한 출·퇴근시 이용하는 버스, 개인 승용차와 지하철을 이용할 때는 차량부분에 표시하도록 설명하였다. 또한 시간단위가 30분 또는 1시간이기 때문에 참여자가 30분 또는 1시간 동안 두 장소에 있었다면 두 장소 모두에 표시하도록 하였다. 수거한 시간활동표를 각 장소별로 표시한 곳을 계수하여 참여자 각자의 각 장소별 보낸 시간을 산출하였다.

2.2. 시간가중 평균모델

공기오염물질의 누적 NO₂ 개인노출량은 각 개인이 시간을 소비한 어떤 장소의 농도와 그 장소에서 머무른 시간을 곱하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_c = \sum C_k \cdot T_k \quad (1)$$

(K= 1, ..., N : microenvironment types)

여기서, E_c : Total exposure, C_k : concentration for each microenvironment type and T_k : time allocation for each microenvironment type.

(식 1)을 이용하여 참여자의 공기오염물질의 누적 NO_2 노출량은 개인 주택 실내 및 실외의 NO_2 농도, 사무실 실내의 NO_2 농도 및 각 장소에서 머무른 시간을 곱하여 (식 2)로 나타낼 수 있다. (식 2)는 시간가중 평균모델(TWA : Time Weighted Average)로 정의할 수 있다.

$$P_i = (IH_i \cdot I_i + OH_i \cdot O_i + WI_i \cdot W_i) / (IH_i + OH_i + WI_i) \quad (2)$$

여기서,

- P_i : estimated time-weighted average personal pollutant exposure for participant i,
- IH_i : hours spent inside the home for participant i during sampling period,
- OH_i : hours spent outside the home for participant i during sampling period,
- WI_i : hours spent inside the workplace for participant i during sampling period.
- I_i : measured average indoor pollutant concentration for participant i,
- O_i : measured average outdoor pollutant concentration for participant I,
- W_i : measured average workplace pollutant concentration for participant i.

3. 연구결과

3.1. 시간활동 분석

시간활동 및 NO_2 노출평가 연구에 참여자는 서울에서 95명이었다. 참여자의 평균 연령은 42.1±7.6세였고, 남성과 여성은 각각 72명과 23명이었다. 브리스베인에서는 57명이 참여하였으며, 참여자의 평균 연령은 39±9.1세였고, 남성과 여성은 각각 50명과 7명이었다. 서울 참여자 95명과 브리스베인 참여자 57명의 시간활동 행태를 Table 1에 나타내었다. 서울과 브리스베인의 참여자들은 측정기간 동안 주택 실내(서울: 49.7%, 브리스베인: 54.5%)에서 가장 많은 시간을 보냈다. 사무실에서 일하는 시간은 서울에서 평균 7.4hr로 하루 활동 형태의 30.9%, 브리스베인에서 평균 6.9hr로 29.1%을 나타내었다. 서울의 전체 참여자들은 실내에서 하루 24

시간 중 평균 83.8%, 실외에서 평균 9.8%를 나타내었고, 브리스베인에서는 실내에서 88.3%, 실외에서 4.1%를 나타내었다. 출·퇴근 등의 차량에서 보낸 시간은 브리스베인의 직장인들이 보낸 시간(1.7hr)이 서울의 직장인들이 보낸 시간(1.5hr)보다 다소 많았다. 이것은 서울이 브리스베인 보다 공공 교통의 발달로 차량이동 시간이 적었던 것으로 판단된다.

Table 1. Fraction of time spent by subjects in indoor, outdoor and transportation

		Indoor			Outdoor			Transportation
		Home	Office	Other	Near home	Near Office	Other	
Seoul, Korea (95 subjects)	Mean hours	11.9 (±2.9)	7.4 (±3.5)	0.8 (±1.4)	0.5 (±0.8)	1.2 (±1.8)	0.6 (±1.4)	1.5 (±1.3)
	%	54.5	29.1	4.7	1.1	2.0	1.0	7.6
	Total %	83.8			9.8			6.4
Brisbane, Australia (57 subjects)	Mean hours	13.1 (±4.9)	6.9 (±3.0)	1.2 (±1.5)	0.3 (±0.3)	0.5 (±0.6)	0.3 (±0.5)	1.7 (±0.9)
	%	49.7	30.9	3.1	2.2	5.0	2.6	6.4
	Total %	88.3			4.1			7.6

서울과 브리스베인 참여자들의 24시간 동안 시간대별 빈도분포를 Fig. 1과 Fig 2에 나타내었다. 서울의 경우 주택에서 보내는 시간은 출근 전과 퇴근 후에 주로 분포하고 있으며, 사무실에서 보내는 시간은 오전 8시부터 오후 6까지 높은 분포를 보였다. 차량이용은 출·퇴근 시간과 관련이 있고, 주로 오전 7시부터 9시까지, 그리고 5시부터 8시까지 차량에서 보낸 시간이 높았다. 대다수의 사람들이 실내에서 많은 시간을 보내고 있음을 알 수 있다. 출·퇴근 시간에서는 실내에서 보낸 시간이 상대적으로 줄어들어 있음을 알 수 있었다. 브리스베인시의 참여자 57명의 24시간 동안 시간대별 빈도분포는 출·퇴근의 시간이 전반적으로 서울시보다 앞서 있지만 비슷한 분포를 보였다.

3.2. 실내·실외 이산화질소 농도 및 개인노출

서울과 브리스베인에서 측정된 NO_2 농도 및 실내/실외 NO_2 농도비를 Table 2에 나타내었다. 측정기간이 서울은 10월말로 가을이었고, 브리스베인은 6월초로 초겨울이었지만 기온의 차이는 두 지역이 비슷한 약 17~20°C 정도였다. 서울에서 실내 및 실외의 NO_2 농도는 브리스베인에서 측정된 NO_2 농도보다 높았고, 실내/실외 NO_2 농도비도 브리스베인 보다 서울이 높았다. NO_2 개인노출은 서울 참여자(40.4±14.0 ppb)가 브리스베인 참여자(15.0±5.2 ppb)에 비해 약 2.7배 높았다. 브리스베인 참여

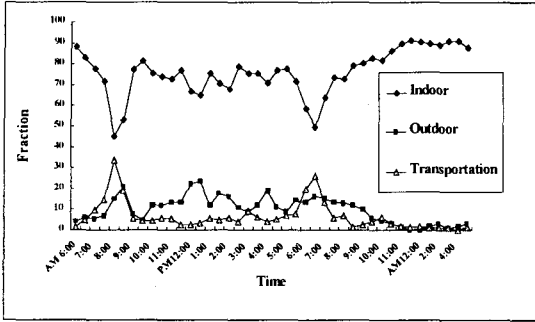


Fig. 1. Fraction of indoor, outdoor and transportation by time of the day in Seoul, Korea.

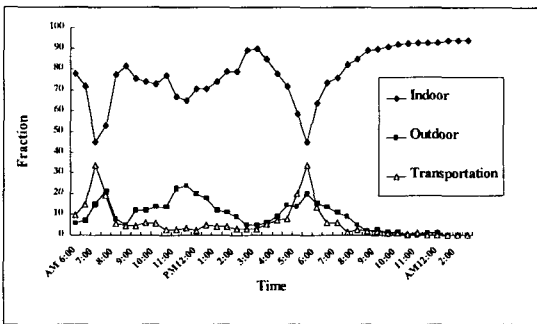


Fig. 2. Fraction of indoor, outdoor and transportation by the time the day in Brisbane, Australia.

자들의 근무 사무실의 NO₂ 실내 농도가 참여자 각 주택의 실내 및 실외 NO₂ 농도보다 높은 것은 사무실이 도시 중심가 근처에 있기 때문일 것으로 판단된다. 일반적으로 실내 NO₂ 발생원은 취사도구로 이용되는 가스레인지, 겨울철 난방기구, 흡연 등이다. 본 연구에서 주택특성은 설문지를 이용하여 조사하였다.

Table 2. Air borne NO₂ concentrations by type of sample places

City	Home			Office	Personal (ppb)
	Indoor (ppb)	Outdoor (ppb)	I/O	Indoor (ppb)	
Seoul	40.4±16.7 (n= 95)	49.9±17.5 (n= 95)	0.83±0.24	38.0±6.9 (n= 16)	40.4±14.0 (n= 95)
Brisbane	10.5±5.6 (n= 57)	14.5±5.8 (n= 57)	0.78±0.55	18.2±5.0 (n= 14)	15.0±5.2 (n= 57)

브리스베인의 참여자 주택 실내에서 취사도구로 가스레인지의 이용, 실내 흡연자, 가스난방기(gas water heater) 有·無에 따른 실내 NO₂ 농도를 비교하였다(Table 3). 가스레인지의 사용이 실내 NO₂ 농도에 가장 큰 영향을 주었다 (p= 0.004). 가스레

인지가 있는 주택의 실내 NO₂ 평균농도는 13.6 ppb였으며, 취사도구로 전기레인을 사용하는 주택은 9.1 ppb였다. 실내 흡연자가 있는 주택의 실내 평균 NO₂ 농도는 14.9 ppb로 실내 흡연자가 없는 곳과 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (p= 0.025). 그리고, 가스난방기도 실내 NO₂ 농도 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다. 취사도구로 가스레인지의 이용에 따른 평균 실내/실외 NO₂ 농도비는 가스레인을 사용하는 주택들이 1.03, 가스레인을 사용하지 않는 주택들이 0.67이었다. 서울 95명의 참여자 중에서 93명의 주택이 가스레인을 이용하였고, 측정기간 동안은 가을철이어서 가스 난방기를 사용하는 주택은 없었기 때문에 가스사용에 의한 실내 NO₂ 영향을 분석할 수 없었다. 실내 흡연자에 따른 결과는 브리스베인과 달리 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다.

Table 3. Indoor NO₂ concentrations associated with house characteristics in Brisbane, Australia

Characteristics	Indoor NO ₂ concentration (ppb)	p-value
Gas range	Yes 13.6±6.2 (18 houses)	0.004
	No 9.1±4.7 (39 houses)	
Smoker	Yes 14.9±7.7 (7 houses)	0.025
	No 9.9±5.0 (50 houses)	
Gas water heater	Yes 13.2±5.1 (12 houses)	0.059
	No 9.8±5.5 (45 houses)	

3.3. 이산화질소 개인노출과 여러 요소의 상관성 분석

NO₂ 개인노출과 참여자 개인 주택의 실내 및 실외 NO₂ 농도의 상관성을 분석하였다. 서울 및 브리스베인의 참여자 97명과 57명의 주택 실내와 실외 NO₂ 농도의 상관관계를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 서울과 브리스베인의 주택 실내와 실외 NO₂ 농도사이의 Pearson 상관관계수(r) 값은 각각 0.69 (p<0.01)과 0.66(p<0.01)로 비슷한 값을 보였다. 이것은 실외 NO₂ 농도가 두 도시에서 비슷하게 실내 NO₂ 농도에 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다. NO₂ 개인노출은 참여자가 평균적으로 주택 실내에서 보내는 시간이 많기 때문에 주택 실내 NO₂ 농도와 상관성이 실외 NO₂ 농도 보다 높을 것으로 예상되었다. 분석 결과 서울 참여자 개인 주택의 개인 NO₂ 노출은 실외 NO₂ 농도(r= 0.66, p<0.01) 보다 실내 NO₂ 농도(r= 0.70, p<0.01)와 상관성이 다소 높았다(Fig. 5와 Fig. 7). 브리스베인에서도 참여자 57명의 개인 NO₂ 노출은 주택의 실외 NO₂

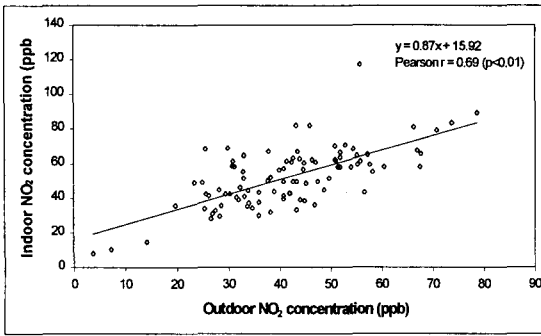


Fig. 3. Relationship between indoor and outdoor NO₂ measurements in Seoul, Korea(n= 95).

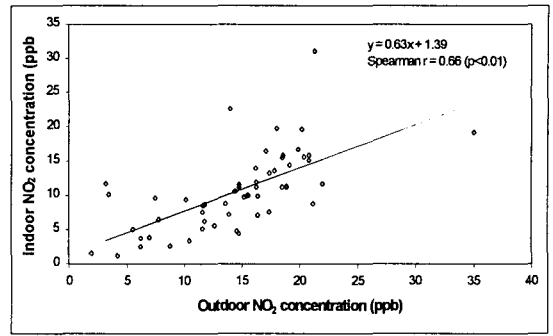


Fig. 4. Relationship between indoor and outdoor NO₂ measurements in Brisbane, Australia(n= 57).

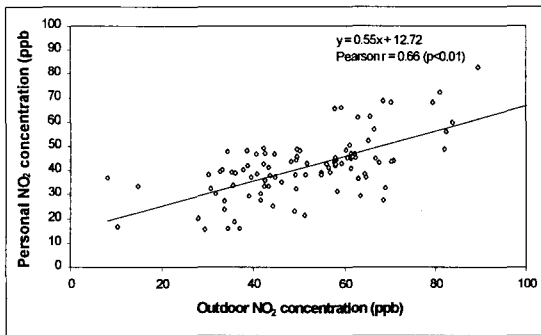


Fig. 5. Relationship between personal and outdoor NO₂ measurements in Seoul, Korea(n= 95).

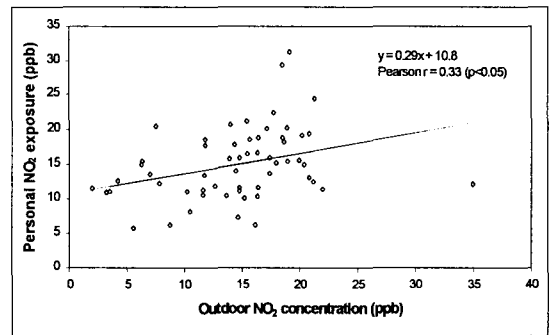


Fig. 6. Relationship between personal and outdoor NO₂ measurements in Brisbane, Australia(n= 57).

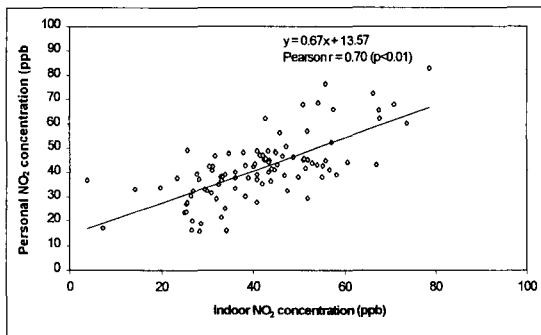


Fig. 7. Relationship between personal and indoor NO₂ measurements in Seoul, Korea(n= 95).

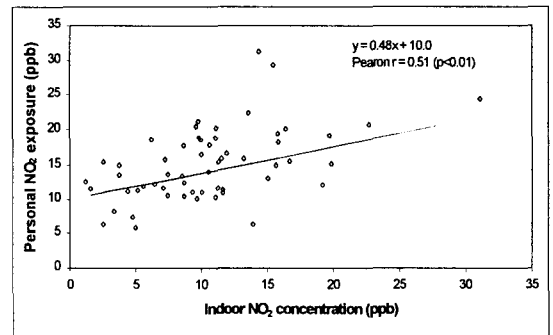


Fig. 8. Relationship between personal and indoor NO₂ measurements in Brisbane, Australia(n= 57).

농도($r = 0.33, p < 0.05$)보다 실내 NO₂ 농도($r = 0.51, p < 0.01$)와 연관성이 높았다(Fig. 6과 Fig. 8).

3.4. 이산화질소 개인노출 예측

서울에서 시간가중 평균모델 식 (2)를 이용하여 예측된 평균 NO₂ 개인노출은 39.6 ± 10.3 ppb이었으며, NO₂ 수동식 시료채취기를 이용하여 실측된 개인노출은 평균 40.4 ± 14.0 ppb이었다. 참여한 사람

들이 시간을 보낸 모든 실내환경 및 실외환경의 NO₂ 농도가 측정 된 것은 아니었지만, 식 (2)에서 예측된 NO₂ 개인노출과 실측된 NO₂ 개인노출간의 Pearson 상관계수 값(r)은 0.69였으며 통계적으로 유의하게 연관성이 있었다($p < 0.001$). 또한 짝비교한 결과에 의하면 예측된 값과 실측된 값은 통계적으로 유의한 차이를 보였다(paired t-test, $p < 0.001$)(Fig 9). 브리스베인에서는 예측된 평균 NO₂ 개인노출은

11.2±4.0 ppb이었고, 실측된 NO₂는 15.2±5.3 ppb였다. 이곳에서도 서울과 같이 예측한 값과 실측값이 통계적으로 유의한 연관성을 보였다(Pearson r=0.66, p<0.001)(Fig 10). 그리고 브리스베인에서도 서울과 마찬가지로 두 NO₂ 농도 값은 통계적인 차이를 나타내었다(paired t-test, p<0.001). 두 도시의 시간가중 평균모형을 이용한 예측값은 NO₂ 수동식 시료채취기를 이용하여 실측한 측정값보다 낮은 값을 나타내어 측정되지 않은 미세환경(microenvironment)이 NO₂ 개인노출에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

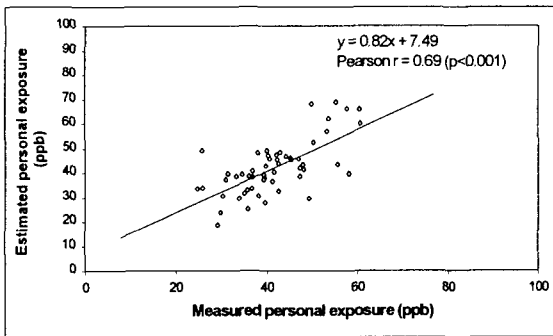


Fig. 9. Association between measured personal NO₂ exposure and estimated NO₂ exposure by time weighted average model in Seoul, Korea.

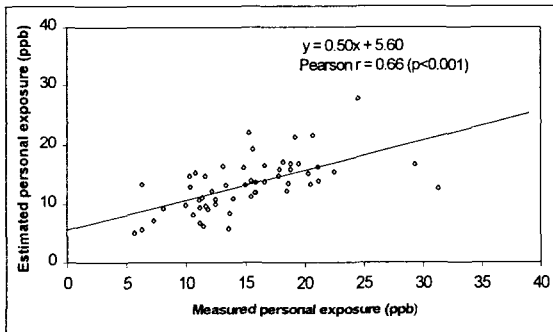


Fig. 10. Association between measured personal NO₂ exposure and estimated NO₂ exposure by time weighted average model in Brisbane, Australia.

본 연구에서 시간가중 평균모형을 이용하여 예측된 NO₂ 개인노출(P_i)과 수동식 시료채취기에 의해 실측된 NO₂ 개인노출(P)의 차이를 시간활동표에서 측정되지 않은 다른 미세환경에 의해서 설명될 수 있으며, 다중회귀방정식의 회귀계수(b)를 이용하여 분석하였다(식 3).

$$P - P_i = b_{I0} \cdot F_{I0} + b_{(SO+OO)} \cdot F_{(SO+OO)} + b_T \cdot F_T \quad (3)$$

여기서,

- P : measured personal NO₂ exposure (ppb), participant i,
- F_{I0} : fraction of hours spent inside other than home and workplace,
- F_(so+oo) : fraction of hours spent outside other than near home,
- F_T : fraction of hours spent on transportation.

서울 참여자의 다중회귀분석 결과에서는 사무실 근처와 기타 실외에서 활동에 의한 회귀계수 값이 통계적으로 유의하였다(p=0.023)(Table 4). 서울에서 NO₂ 농도가 측정되지 않은 미세환경 중에서 NO₂ 개인노출에 영향을 주는 것은 사무실 근처의 실외와 기타 다른 실외 지역에서 영향을 받은 것으로 해석될 수 있다. 브리스베인에서 유의한 회귀계수 값을 나타내 것은 NO₂ 농도가 측정되지 않은 미세환경 중에서 NO₂ 개인노출에 영향을 주는 것은 출·퇴근 등으로 차량이동에 의한 것이었다(p=0.019)(Table 5).

Table 4. Multi-regression analysis by fraction of time in three microenvironments in Seoul, Korea

	Regression coefficient ± SE	p-value
Indoor other than home and office	-0.19 ± 0.2	0.249
Outside of office and other outdoors	0.34 ± 0.1	0.023
Transportation	9.99E-02 ± 0.2	0.569

Table 5. Multi-regression analysis by fraction of time in three microenvironments in Brisbane, Australia

	Regression coefficient ± SE	p-value
Indoor other than home and office	-14.4 ± 10.4	0.176
Outside of office and other outdoors	36.0 ± 24.9	0.151
Transportation	32.0 ± 13.2	0.019

4. 연구고찰

시간대별 활동에서 차량 등으로 보낸 시간을 실내공간으로 가정하면, 서울와 브리스베인 참여자

대부분이 하루 24시간 동안 실내에서 보낸 시간은 90% 이상이었다. 그리고, 참여자들이 각 주택 실내에서 하루 중 시간을 보낸 비율은 서울에서 49.7%와 브리스베인에서 54.5%인 것을 고려하면 NO₂ 개인노출은 주택 실내 NO₂ 농도에 주로 영향을 받을 것으로 예상되었다. 이 예상을 근거로 개인 NO₂ 노출에 영향을 주는 미세환경의 상관성 분석 결과, NO₂ 개인노출은 서울과 브리스베인 모두에서 참여자 각 주택의 실내 NO₂ 농도와 높은 연관성을 나타내었다. 이것은 실내공기가 개인의 공기오염물질 노출에 주요 요인임을 나타내는 것이다.

실내/실외 NO₂ 농도비는 서울(0.83±0.24)이 브리스베인(0.78±0.55)보다 높았다. 이것은 브리스베인이 서울에 비해 실외 NO₂ 농도에 영향을 더 받기 때문이며, 서울이 브리스베인 보다 실내 발생원이 존재 또는 더 많기 때문일 것이다. 주택특성 및 개인성향 조사에 의하면 브리스베인의 39 주택에서는 취사용으로 전기레인지어를 사용하였고, 실내 흡연자도 브리스베인 보다 서울이 더 많았다.

실내 흡연 有·無에 따른 실내 NO₂ 농도 영향 정도는 브리스베인에서 실내 흡연자가 있는 주택이 실내 흡연자가 없는 주택보다 통계적으로 유의하게 높았지만, 서울 참여자 주택에서는 차이를 보이지 않았다. 이것은 실내 가스레인지의 사용으로 주요 NO₂ 발생원이 존재할 때는 흡연에 의한 NO₂ 발생은 무시할 수 있다는 Dimitroulopoulou 등의 연구 결과로 설명될 수 있었다.¹⁸⁾

서울의 NO₂ 개인노출과 실내 및 실외 NO₂ 농도의 상관성 결과는 Levy 등의 연구에서 실내 NO₂ 농도가 개인 NO₂ 노출에 실외 NO₂ 농도와 비교하여 통계적으로 높은 연관성을 갖고 있는 것과 다른 결과를 보이고 있지만,¹⁹⁾ 개인노출 측정에서 1일 또는 2일 정도의 노출기간이 일별, 월별, 계절별로 변화할 수 있으며 또한 측정된 실외 NO₂ 농도는 각 주택의 건물 밖의 농도이기 때문에 근무지 근처의 실외와 차량이동에 의한 실외 활동의 따른 NO₂ 농도가 개인 NO₂ 노출에 영향을 주었을 것으로 고려될 수 있다. 그리고 서울 실외 대기의 NO₂ 농도가 브리스베인 보다 상대적으로 높기 때문에 이런 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

NO₂ 농도가 측정되지 않는 미세환경 중 NO₂ 개인노출 영향은 브리스베인과 서울이 다른 결과를 나타내었는데, 그 이유는 서울 참여 직장인은 주로 전철을 이용하여 출·퇴근을 하였으며, 그리고 직장인 중 근무시간에 실외근무가 가능하거나 주로 실외근무를 하는 환경위생과(8명), 교통지도과(7명)와 청소과의 미화원(18명)의 참여 때문인 것으로

생각된다. 그리고, 브리스베인의 참여자들은 차량으로 보낸 시간이 서울보다 높았기 때문인 것으로 생각되며, 또한 브리스베인은 지하철 시설이 없으며 참여자들이 대부분 개인 자동차에 의한 출·퇴근이 배기가스에 의한 NO₂ 노출에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 이 결과는 직업적 요인으로 특정 오염물질에 노출될 수 있음을 의미한다.

개인노출에 적용된 시간가중 평균모델을 이용하여 서울 시민과 브리스베인 시민의 NO₂ 노출빈도를 비교하기 위하여 @Risk (Palisade Co.) 소프트웨어를 이용하여 Monte-Carlo 10,000회 모의실험(simulation)하였다(Fig 11).²⁰⁾ 서울 및 브리스베인 각각의 주택에서 측정된 실내 및 실외의 NO₂ 농도는 근사적으로 대수정규분포(log-normal distribution)를 보였다(p<0.05). 따라서, 본 연구에서 측정된 주택 실내 및 실외 그리고 사무실 NO₂ 농도를 대수정규분포로, 시간활동 행태는 정규분포로 가정하여 서울과 브리스베인 인구 집단 특히 사무실 근로자의 NO₂ 노출 빈도분포를 예측하였다. 모의실험 결과를 보면 서울과 브리스베인의 참여자 수가 차이가 있기 때문에 표준편차의 차이가 존재할 수 있지만, 서울 사무실 근로자들이 브리스베인의 사무실 근로자들보다 고농도의 NO₂에 노출될 수 있고, 또한 NO₂ 개인노출의 농도 범위가 큰 것으로 나타났다.

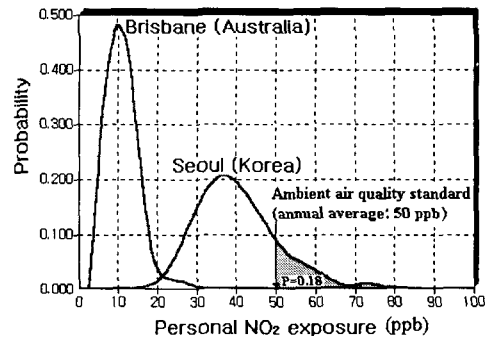


Fig. 11. Monte-Carlo simulation of NO₂ personal exposures by the time weighted average model.

한국과 호주의 NO₂ 연간평균치 기준이 50 ppb 임을 고려할 때, Monte-Carlo 모의실험 결과에 의하면 서울 사무실 근로자의 NO₂ 개인노출은 약 18%가 기준치를 초과할 수 있음을 알 수 있다(Fig. 11). 이것은 공기오염물질 NO₂가 실내 및 실외에서 모두 노출될 수 있기 때문이다. 각 개인주택에서 가스레인지 같은 취사도구의 사용은 비용 등의 문제로 건강에 위해한 것을 알면서도 흡연을 하는 것과 같은 개인의 선택 사항이지만, 실내 및 실외에

서 NO₂ 총노출을 고려하면 실외의 NO₂ 노출은 국가기관 및 정책입안자가 국민의 건강을 위하여 적절한 규제 및 대처방안을 마련해야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 한국의 서울 Y구청 95직원과 호주의 브리스베인 시청 57직원을 대상으로 공기오염물질의 노출평가지 중요한 요인인 시간활동 행태와 이산화질소(NO₂)의 실내, 실외 및 개인노출을 동시에 측정하였다. 한 개인 또는 그 집단의 시간활동 행태는 공기오염물질에 고농도 또는 저농도에 노출될 수 있기 때문에 중요하며, 어떤 지역 사람들의 시간활동은 오염물질 농도와 조합될 때 노출의 빈도 분포를 제공할 수 있다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 서울의 참여자 95명은 측정기간 2일 동안 시간 행태 분포는 실내에서 83.8%, 실외에서 9.8%와 차량에서 6.4%였다. 실내환경 중 주택(49.7%)과 사무실(30.9%)에서 많은 시간을 보내고 있었다. 그리고, 브리스베인 참여자 57명의 시간 행태 분포는 실내에서 88.3%, 실외에서 4.1%와 차량에서 7.6%이었다.
- 2) 서울 참여자들의 실내(40.4±16.7 ppb), 실외(49.9±17.5 ppb) 및 개인(40.4±14.0 ppb)의 NO₂ 노출은 브리스베인(실내 : 10.5±5.6 ppb, 실외 : 14.5±5.8 ppb, 개인노출 : 15.0±5.2 ppb) 참여자들에 비해서 모두 높았다. 서울의 실내/실외 NO₂ 농도비는 평균 0.83으로 브리스베인의 평균 0.78보다 높았다. 실내 NO₂ 농도는 서울보다 브리스베인이 실외 NO₂ 농도에 더 영향을 받거나, 서울 참여자들의 실내 NO₂ 발생원이 더 많은 것으로 해석할 수 있다.
- 3) 서울 참여자의 NO₂ 개인노출은 각 주택의 실외 NO₂ 농도(r= 0.66, p<0.01) 보다 주택 실내 NO₂ 농도(r= 0.70, p<0.01)와 상관성이 다소 높았으며, 브리스베인에서 개인노출은 주택 실외 NO₂ 농도(r= 0.33, p<0.05) 보다 주택 실내 NO₂ 농도(r= 0.51, p<0.01)와 높은 상관성을 나타내었다.
- 4) 시간가중 평균모델을 이용하여 예측된 평균 NO₂ 개인노출은 서울에서 39.6±10.3 ppb였으며, 수동식 시료채취기를 이용하여 실측된 NO₂ 개인노출은 평균 40.4±14.0 ppb이었다. 예측된 개인노출과 실측된 개인노출 사이의

Pearson 계수 값(r)은 0.69였으며 통계적으로 유의하게 연관성을 보였다(p< 0.001). 그리고, 브리스베인에서 11.2±4.0 ppb였으며 실측된 개인노출은 평균 15.3±5.3 ppb이었고, 통계적으로 유의한 상관성을 보였다(r= 0.66, p<0.001).

- 5) 시간가중 평균모델에서 NO₂ 농도를 측정하지 않은 실내환경, 실외환경, 차량에서 NO₂ 개인노출에 영향을 주는 것은 다중회귀분석 결과 서울에서는 사무실 근처와 기타 실외 지역에서 영향을 받았고(p= 0.023), 브리스베인은 차량에서 영향을 받았다(p= 0.019).

감사의 글

본 연구는 Korea-Australia Fellowship의 연구비 지원으로 수행된 연구중의 일부이며, 연구비를 지원하여 준 호주정부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 양원호, 이선화, 백도명, 2001, 시간가중치 평균 모델을 이용한 이산화질소의 노출평가 및 예측, 한국대기환경학회지, 17(3), 251-258.
- 2) Xu, X., D. W. Dockery, and L. Wang, 1991, Effects of air pollution on adult pulmonary function, Archives of Environmental Health, 46(4), 198- 206.
- 3) Nielsen, O. R., M. L. Nielsen, and J. Gehhl, 1995, Traffic-related air pollution: exposure and health effects in Copenhagen street cleaners and cemetery workers, Archives of Environmental Health, 50(3), 207-213.
- 4) Lee, J. T., D. Shin, and Y. Chung, 1999, Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea, Environmental Health Perspectives, 107(2), 149-154.
- 5) Monn, C., O. Brandli, C. Schindler, U. Ackemann-Liebrich, P. Leuenberger and SAPALDIA Team, 1998, Personal exposure to nitrogen dioxide in Switzerland, The Science of the Total Environment, 215, 243-251.
- 6) Esmen, N. A., 1985, The status of indoor air pollution, Environmental Health Perspectives, 62, 259-265.
- 7) USEPA, 1997, Exposure Factors Handbook I, General Factors, EPA/600/P-95/002Fa.
- 8) Stevenson, K., T. Bush, and D. Mooney, 2001, Five years of nitrogen dioxide measurement with diffusion tube samplers at over 1000

- sites in the UK, *Atmospheric Environment*, 35, 281-287.
- 9) Lee, K., W. Yang, and N. D. Bofinger, 2000, Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposure in Australia, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50, 1739-1744.
 - 10) Quackenboss, J. J., J. D. Spengler, M. S. Kanarek, R. Letz, and C. P. Duffy, 1986, Personal exposure to nitrogen dioxide: Relationship to indoor/outdoor air quality and activity patterns, *Environ. Sci. Technol.*, 20(8), 775-783.
 - 11) Schwab, M., S. D. Colome, J. D. Spengler, P. B. Ryan, and I. H. Billick, 1990, Activity patterns applied to pollutant exposure assessment : data from a personal monitoring study in Los Angeles, *Toxicology and Industrial Health*, 6(6), 517-532.
 - 12) 통계청, 2000, 생활시간조사보고서, 제 1권 생활 시간량편.
 - 13) Johnson, T., T. Long, and W. Ollison, 2000, Prediction of hourly microenvironmental concentrations of fine particles based on measurements obtained from the Baltimore scripted activity study, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 10, 403-411.
 - 14) Smith, R. L., 1994, Use of Monte Carlo simulation for human exposure assessment at a Superfund site, *Risk Analysis*, 14(4), 433-439.
 - 15) Hope, B. K., 2000, Generating probabilistic spatially-Explicit individual and population exposure estimates for ecological risk assessment, *Risk Analysis*, 20(5), 573-589.
 - 16) 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.
 - 17) 환경부, 1999, 실내공기질 관리방안에 관한 연구.
 - 18) Dimitroulopoulou, C., M. R. Ashmore, M. A. Byrne, and R. P. Kinnersley, 2001, Modelling of indoor exposure to nitrogen dioxide, *Atmosphere Environment*, 35, 269-279.
 - 19) 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.
 - 20) Thompson, K. M., D. E. Burmaster, and E. A. Crouch, 1992, Monte-Carlo techniques for quantitative uncertainty analysis in public health risk assessments, *Risk Analysis*, 12(1), 53-63.