

계절에 따른 사무실 근로자의 이산화질소 노출에 대한 직장 및 주택실내 기여도

Contribution of Workplace and House Indoors for Personal Nitrogen Dioxide Exposure in Office Workers According to Season

양원호 · 김동건* · 홍가연 · 김순신 · 안호기

Wonho Yang · Dongkeon Kim* · Gayeon Hong · Sunshin Kim · Hogi Ahn

대구가톨릭대학교 산업보건학과

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

ABSTRACT

People are exposed to air pollution from a range of indoor and outdoor sources. Concentration of nitrogen dioxide (NO₂), which is hazardous to health, can be significant in both types of environment. This paper reports on the measurement and analysis of indoor and outdoor NO₂ concentrations and their comparison with measured personal exposure in house and workplace indoors with 28 office workers during winter and summer seasons. Time activity patterns were used to determine the effects of these factors on personal exposure. The residential indoor and office indoor times were 12.29±1.58, 7.86±1.97 hours in winter and 11.04±2.18, 8.26±2.04 hours in summer, respectively. Measured residential indoor, outdoor and office indoor, personal exposure NO₂ concentrations were 23.10±8.46 ppb, 23.97±6.86 ppb, 21.91±11.50 ppb, 22.08±8.64 ppb in winter, and 19.94±6.04 ppb, 21.21±6.84 ppb, 22.55±9.54 ppb, 27.45±8.96 ppb in summer, respectively. Contributions of residential and office indoor NO₂ concentration on personal exposure were estimated by 57.98%, 35.62% in winter and 37.38%, 28.97% in summer, respectively.

Key words : Office workers, Personal exposure, Nitrogen dioxide, Contribution

I. 서 론

산업화와 도시화가 급격히 발전되면서 도시의 인구집중과 산업시설 및 교통량 증가는 도시지역 대기환경 오염을 더욱 악화시켰으며, 경제적 수준의 향상과 더불어 도시인의 생활양식과 직장인의 근무양식에도 큰 변화를 가져왔다. 이와 함께 현대 도시인의 경우 일상생활 중 약 90% 이상의 시간을 실내에서 생활하게 됨으로써 쾌적한 실내환경(Indoor Environment, IE)에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다(Yang et al., 2011).

실내환경은 다양한 공기 오염물질의 발생원이 있으며, 에너지 절약 등을 위한 주택이나 건물의 환기량

감소에 의해 재실자의 노출을 증가시킬 가능성이 높아지고 있는 실정이다(Lai et al., 2004). 또한 환기에 의한 실외 공기 오염물질의 유입도 반드시 고려해야 한다. 이러한 이유로 실내환경의 공기 오염물질의 노출에 따른 건강영향이 보건학적으로 중요한 관심사가 되고 있다(Sundell, 2004).

이산화질소(NO₂)는 대기 및 실내환경에서 가장 일반적인 공기오염물질이며 연소에 따른 열적 질소 산화물이다(Lai et al, 2006; Hanninen et al, 2004). 또한 국내뿐만 아니라 미국, 일본 등의 선진국에서도 대기환경기준으로 규제하는 공기오염물질이며, 실외 대기에서는 발전소, 산업공정, 자동차 배기가스 등에서 발생된다(Kodama et al., 2002). 실내환경에서는 가스렌지

*Corresponding author: Kim Dongkeon, 경북 경산시 하양읍 대구가톨릭대학교 산업보건학과, Tel: 053-850-3739, Fax: 053-850-3739, E-mail: jjkdg@naver.com, Received: 2012. 1. 16., Revised: 2012. 2. 20., Accepted: 2012. 3. 21.

(gas range) 등의 취사용 도구, 난방도구, 흡연과 같은 연소과정, 실외에서 실내로 유입되는 오염물질 등이 NO₂를 발생시키는 원인이 되므로 중요한 오염물질이다(Wallace, 1996). 실내의 NO₂ 농도는 실내·외 공기 환기량과 실내 건축 자재와 가구 등과의 표면반응 및 실내 다른 오염물질과의 반응으로 인한 감소(Spicer et al., 1989; Sexton et al., 1983), 실내에서 연소도구로 인한 발생, 실내 환기장치 등 주택특성에 따라 영향을 받기 때문에 각 지역 및 건축종류에 따른 차이가 있을 수 있다(Christopher et al., 2000). NO₂의 평균 노출 농도가 40 µg/m³을 초과할 때, 천식 증상을 가지고 있는 7~15세 학교 학생들의 폐기능 저하를 야기시킬 가능성이 있다고 하였으며(Pershagen et al., 1995), 주택의 가스렌지 사용에 의한 NO₂ 노출은 특히 어린이 등 민감집단의 위해도를 증가시킬 수 있음을 보고하였다(Lipsett, 1999).

일반적으로 근로자는 집에서 차량을 이용하여 직장 출근하며, 퇴근 후 바로 집으로 가거나 또는 사업상 및 모임 등에 참여 후 집으로 귀가하는 시간활동 양상을 보인다(이현수 등, 2010). 본 연구는 사무실 근로자를 대상으로 1일 동안 유해 공기오염물질인 NO₂의 개인노출에 영향을 주는 주요 국소환경(microenvironments)인 주택실내와 직장실내의 노출 기여율을 평가하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상

본 연구는 2010년부터 2011년 사이의 겨울과 여름에 이루어 졌으며, 대구 및 경북지역의 사무실 근로자 30명을 대상으로 참여자가 현재 살고 있는 주택과 직장을 측정하였다.

2. NO₂ 측정 및 분석

NO₂ 측정 기간은 겨울(2010년) 및 여름(2011년)에 각각 3일(72시간) 동안 국소환경 측정 및 개인노출을 측정하였다. 개인노출의 경우 호흡기에서 약 30cm 이내에서 측정을 하였고, 주택실내는 실내공간의 대표인 거실에서 측정이 이루어졌으며, 직장실내는 사무실의 중앙에서 측정이 이루어졌다. 측정 위치는 연소장치 발생원에서 3m 이상 그리고 창문 또는 문

으로부터 2m 이상, 높이는 바닥으로부터 1.2m 이상이 되도록 하였다. 실외는 지면으로부터 1m 이상이 되도록 하였고, 비나 눈이 맞지 않도록 비마개(rain protector)를 설치하여 환기가 잘 되는 곳에 위치하도록 하였다.

NO₂ 측정은 수동식 시료채취기(Toyo Roshi Kaisha Ltd.)를 이용하였다(Christopher et al., 2000). 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 이용하여 확산(diffusion)과 투과(infiltration)라는 물리적인 과정과 화학적 반응을 이용하여 수동식 시료채취기 내부에 있는 셀룰로우스 필터(chromatography paper, whatman, USA)에 triethanolamine 용액이 흡수되어 NO₂를 포집한다. 포집된 NO₂는 UV-visible spectrophotometer (Shimadzu, UV-1650PC, Japan)를 이용하여 정량분석을 하였다.

3. 시간활동 양상

본 연구의 대상자인 사무실 근로자에 대한 주요 국소환경에서의 시간활동 양상을 알아보기 위해 NO₂를 측정하는 동안 시간활동일지(time-activity diary)를 기록하게 하였다. 시간활동일지는 24시간을 30분 단위로 어느 장소에 있었는지를 기록하도록 하였으며, 주로 한 행동(주행동)을 작성하게 되어 있으며, 주택·회사·기타의 실내 및 실외, 교통수단이 포함되어 있다.

4. 기여율 계산

근로자 한 사람(i)의 24시간 동안 개인노출(Ei)은 측정된 개인노출 농도를 바탕으로 직접 작성한 시간활동일지와 시간가중 노출모델을 이용하여 NO₂의 농도를 예측할 수 있으며, 시간가중모델의 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$E_i = \sum_{j=1}^m E_{ij} = \sum_{j=1}^m F_{ij} \times C_{ij} \quad (1)$$

여기서, E_{ij} = 개인(i)의 국소환경(j)(ppb) 노출, F_{ij} = 개인(i)이 하루 24시간 동안 국소환경(j)에서 보낸 시간 분율, C_{ij} = 개인(i)이 존재한 각 국소환경에서 평균 공기오염물질 농도(ppb), m = 각 국소환경의 수.

위의 모델에서 각 국소환경의 공기오염물질 농도와 근로자가 각 국소환경에서 보낸 시간을 알면 개인노출을 추정할 수 있는데, 각 국소환경의 개인노출에 대한 기여율은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\text{각 국소환경의 기여율(\%)} = [\text{Cin} \times \text{Tin}] / \text{Cper} \times 100 \quad (2)$$

여기서, Cin: 주택실내 NO₂ 농도(ppb), Tin: 주택실내 재질시간(hr), Cper: 개인 NO₂ 노출농도

III. 결과 및 고찰

1. 설문조사 결과

측정 대상자들의 기본적인 설문 내용은 Table 1에 나타내었다. 대구 경북에 거주하는 직장인 30명을 제외하였으며, 측정기 분실 및 중도 포기 등으로 최종 28명이 본 연구에 참여하였다. 대상자의 평균 연령은 45.4세 이었으며, 직업의 종류는 관리자 9명, 기능원 5명 등 이었다. 흡연자는 28명 중 7명 이었으며, 간접 흡연이라고 답한 사람은 21명 이었다. 이산화질소(NO₂) 발생 및 노출과 관련된 설문으로는 주택실내에서 가스렌지 사용은 100% 이었다. 거주형태는 대부분이 아파트 거주였고, 주택 주변 도로변 형태는 1

차선이라고 답한 사람은 10명 이었다.

2. 시간활동 양상

본 연구에 참여한 사무실 근로자 28명에 대해 겨울과 여름에 각각 시간활동 양상을 분석하여 Table 2에 나타내었다. 겨울의 경우 1일 중 주택실내에서 보내는 시간이 51.22% 였으며, 직장실내 32.76%, 실외 5.50%, 이동 5.53%를 나타내었다. 반면 여름의 경우 주택실내 46.02%, 직장실내 34.43%, 실외 7%, 이동 6.88%를 나타내었다. 여름과 겨울에 주택실내 및 직장실내에서 보낸 시간은 정규분포(W-test, $p < 0.05$)를 나타내었다. 참여자들이 주택실내에서 보낸 시간은 한국인 31,643명이 주택실내에서 보낸 시간(14.23 ± 4.56) 보다 낮은 값을 나타내었으며(Yang et al, 2011), 이것은 학생, 전업주부, 노인인구 집단이 포함된 것이기 때문으로 생각할 수 있다. 영국에서 사무실 근로자 60명을 대상으로 한 시간활동 양상은 주택실내에서 겨울 52.8%와 여름 48.0%, 직장실내에서 겨울 31.0%와 여름 29.3%로 본 연구와 비교할 때 주택실내에서 보내는 시간은

Table 1. Characterization of the survey participants

Characteristics		Number (%) or Mean±S.D.
Age		45.4±10.7
Jobs	Administrator	9 (32.1)
	Expert	3 (10.7)
	Office	1 (3.6)
	Service	2 (7.1)
	Sale	2 (7.1)
	Technician	5 (17.9)
	Mechanic	3 (7.1)
	Others	3 (7.1)
Smoking	Yes	7 (25.0)
	No	21 (75.0)
Secondhand smoking	Yes	20 (71.4)
	No	8 (28.6)
Using gas range	Yes	28 (100)
	No	0 (0)
House type	Detached house	3 (10.7)
	Apartment	25 (89.3)
Road type	Eight-lane	2 (7.1)
	Four to six-lane	5 (17.9)
	Double lane	10 (35.7)
	Others	1 (3.6)

Table 2. Time activity pattern of participants during winter and summer

Microenvironment	Winter(hr) (n= 28)	Summer(hr) (n= 28)
House indoor	12.29±1.58 (51.22)	11.04±2.18 (46.02)
Indoor Office indoor	7.86±1.97 (32.76)	8.26±2.40 (34.43)
Other indoors	1.17±1.01 (4.89)	1.38±1.31 (5.73)
House outdoor	0.39±0.44 (1.64)	0.42±0.51 (1.75)
Outdoor Other outdoors	0.93±0.96 (3.86)	1.26±1.46 (5.25)
Transport	1.33±1.34 (5.53)	1.65±0.84 (6.88)

다소 높으며, 직장실내에서 보내는 시간은 다소 낮은 것으로 나타났다(Kornartit et al., 2010).

3. 여름과 겨울의 국소환경, 개인노출의 NO₂ 농도 및 상관성

사무실 근로자 28명에 대해 주택 실내외, 직장실내, 개인노출에 대한 NO₂ 농도 결과를 Table 3에 나타내었다. 겨울의 주택 실내의 NO₂ 농도는 평균 23.10±8.46 ppb를 나타내었고, 주택 실외는 23.97±6.86 ppb 이었다. 실내/실외 농도비는 1.01±0.39를 나타내었다. 여름의 경우 주택실내 농도는 겨울보다 다소 낮은 19.94±6.04 ppb이었고, 실내/실외 농도비는 0.99±0.37 ppb를 나타내었다. 겨울과 여름의 주택실내 평균 농도는 각각 21.91±11.50 ppb와 22.55±9.54 ppb를 나타내었으며 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 반면 개인노출의 NO₂ 농도의 경우 겨울의 농도 값은 22.08±8.64 ppb를 나타내었고, 여름의 농도 값은 27.45±8.96 ppb로 겨울보다 통계적으로 유의하게 높았으며(p= 0.026), 이것은 주택실내 및 직장실내 이외의 장소에서 NO₂에 노출된 것으로 판단된다. NO₂ 개인

Table 3. Measured NO₂ levels (ppb) of office workers for winter and summer

	Winter Mean±S.D. (GM)	Summer Mean±S.D. (GM)	p-value
House indoor	23.10±8.46 (21.54)	19.94±6.04 (19.10)	0.114
House outdoor	23.97±6.86 (22.70)	21.21±6.82 (20.29)	0.137
Indoor/Outdoor (I/O)	1.01±0.39	0.99±0.37	0.308
Office indoor	21.91±11.50 (19.45)	22.55±9.54 (20.83)	0.821
Personal exposure	22.08±8.64 (20.43)	27.45±8.96 (26.06)	0.026

노출 농도는 영국의 사무실 근로자에게 측정된 개인 노출 농도 여름 14.0±1.5 ppb, 겨울 9.5±2.4 ppb 보다 높은 농도를 나타내었다(Kornartit et al., 2010). NO₂ 발생 원인을 고려할 때, 주택실내에서는 가스렌지의 사용 그리고 직장실내에서는 환기에 의한 실외공기 유입과 흡연(간접흡연 포함)에 의한 것으로 판단한다(Monn et al., 1998).

Table 4와 Table 5는 여름, 겨울의 주택실내외, 직장실내, 개인노출의 상관성 분석 결과를 나타내었다. 겨울에 측정된 개인노출의 NO₂ 농도는 주택실내 및 직장실내와 통계적으로 유의한 상관관계를 나타내었으며, 주택실내 및 실외의 NO₂ 농도 또한 유의한 상관관계(p=0.002)를 나타내었다. 이것은 개인노출에 주택실내 및 직장실내가 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, 주택실외의 NO₂가 주택실내에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 반면 여름의 경우 개인노출의 NO₂ 농도는 직장실내와 유의한 상관관계를 나타내 주로 직장실내의 NO₂가 주요 영향 환경인 것으로 판

Table 4. Spearman correlation coefficients among measured NO₂ concentrations in winter

Spearman r	Personal exposure	House indoor	House outdoor	Office indoor
Personal exposure	1			
House indoor	0.467* (0.012)	1		
House outdoor	0.330 (0.087)	0.568* (0.002)	1	
Office indoor	0.484* (0.009)	0.340 (0.077)	0.164 (0.405)	1

*: p<0.05, (): p-value

Table 5. Spearman correlation coefficients among measured NO₂ concentrations in summer

Spearman r	personal exposure	House indoor	House outdoor	Office indoor
Personal exposure	1			
House indoor	0.118 (0.549)	1		
House outdoor	0.026 (0.894)	0.415* (0.028)	1	
Office indoor	0.782* (0.000)	0.085 (0.667)	0.057 (0.772)	1

*: p<0.05, (): p-value

단된다. 여름의 주택실내 및 실외 상관관계 역시 유의하게 나타내었다($p=0.028$). 하지만, 주택실내 및 직장실내 외 기타 실내환경인 차량, 식당 등의 영향 가능성을 나타내고 있다. Lee et al.(2002)와 고 등(2002)의 연구에 의하면 식당종업원 및 영업운전자들과 같은 직업군의 NO₂ 개인노출은 각 주택보다 직장 실내의 NO₂ 농도와 높은 상관계수 값을 나타내었지만, 사무실 직장인의 경우 주택 실내 NO₂ 농도가 개인노출의 NO₂ 농도와 유의한 상관성을 나타내었다. 이것은 본 연구결과와 다소 다르지만, 직장실내 재실시간과 직장의 NO₂ 발생원이 없어도 환기에 의해 실외공기의 유입으로 개인노출에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단한다.

4. 개인노출의 주택실내 및 직장실내 기여율

겨울과 여름의 개인 NO₂ 노출에 대한 주택실내와 직장실내의 기여율을 식(1)과 식(2)을 이용하여 산출하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 겨울 측정된 개인 NO₂ 노출에 대한 주택실내의 기여율은 평균 57.98%, 직장실내에 대한 기여율은 평균 35.62%를 나타내었다. 여름의 경우에는 주택실내의 기여율은 평균 37.38%, 직장실내에 대한 기여율은 28.97%를 나타내었다.

겨울의 경우 주택실내와 직장실내의 기여율을 합산하면 대략 93.6%를 나타내는데, 이것은 직장인의 NO₂ 노출은 주택실내와 직장실내 환경의 측정으로 개인노출을 평가할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 반면 여름의 경우 주택실내와 직장실내의 기여율을 합산하면 대략 66.36%를 나타내는데, 주택실내와 직장실내 외의 환경에서 NO₂ 노출에 노출될 수 있음을 나타내고 있다. 이것은 여름철 시간활동 양상에서 기타실내, 실외, 이동에서 보내는 시간이 높은 것을 고려할 수 있다.

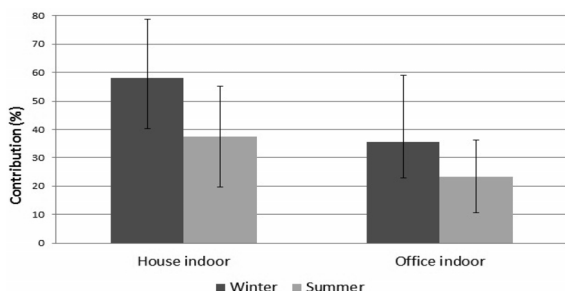


Figure 1. Contribution of house and office indoors for personal NO₂ exposure

V. 결 론

본 연구는 사무실 근로자를 대상으로 주요 국소환경(주택, 직장 등)에서 이산화질소(NO₂)의 노출 양상을 평가하였다. 사무실 직장인의 겨울에 측정된 주택실내의 NO₂ 농도는 평균 23.10 ppb, 주택실외 23.97 ppb 이었다. 여름에 측정된 주택실내 NO₂ 농도는 19.94 ppb, 주택실외 21.21 ppb 이었다. 개인노출의 경우 여름의 농도가 겨울의 농도보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났다($p=0.026$). 겨울의 개인노출은 주택실내 및 직장실내에서 주로 영향을 주었으며, 여름은 직장실내의 NO₂ 농도이었지만 차량이동 등 기타 실내환경의 영향 가능성을 나타내었다. 겨울에 측정된 개인 NO₂ 노출에 대한 주택실내의 기여율은 평균 57.98% 이었으며, 직장실내의 기여율은 35.62%를 나타내었고, 여름의 경우 주택실내의 기여율은 평균 37.38%, 직장실내 28.97%로 합산하면 66.36%를 기여하는 것으로 추정되어 주택실내 및 직장실내 외 기타 실내환경이 개인노출에 영향을 주고 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 고영립, 양원호, 정문호. 서울시 일부 음식점 종업원의 간접흡연 노출량 측정. 한국환경위생학회지, 2002; 28 (2): 173-182
- 양원호, 이기영, 박경화, 윤충식, 손부순, 전준민, 이현수, 최옥희, 유승도, 한진석. 한국인의 평일 및 주말의 국소환경 시간활동 양상. 한국실내환경학회지 2009; 6 (4): 267-274
- 이현수, 좌이 지엔페이, 우병렬, 황문영, 박충희, 유승도, 양원호. 직장인의 시간활동 양상 평가. 한국산업위생학회지 2010; 20 (2): 102-110
- Christopher Y, Chao H and Anthony L. A study of personal exposure to nitrogen dioxide using passive samplers, Building and Environment, 2000; 35: 545-553.

- Hanninen OO, Alm S, Katsouyanni K, Kunzli N, Maroni M, Nieuwenhuijsen MJ, Saarela K, Sram RJ, Zmirou D, Jantunen MJ. The EXPOLIS study: implications for exposure research and environmental policy in Europe, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2004; 14: 440-456.
- Kodama Y, Arashidani K, Tokui N, Kawamoto T, Matsuno K, Kunugita N, Minakawa N. Environmental NO₂ concentration and exposure in daily life along main roads in Tokyo. *Environmental Research Section A*, 2002; 89: 236-244.
- Kornartit C, Sokhi RS, Burton MA, Ravinda K. Activity pattern and personal exposure to nitrogen dioxide in indoor and outdoor environments, *Environmental International*, 2010; 36: 36-45.
- Lai HK, Kendall M, Ferrier H, Lindup I, Al, S, Hanninen O, Jantunen M, Mathys P, Colville R, Ashmore MR. Personal exposures and microenvironment concentrations of PM_{2.5}, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK, *Atmospheric Environment*, 2004; 38: 6399-6410.
- Lai HK, Bayer-Oglesby L, Colville R, Gotschi T, Jantunen M, Kunzli N, Kulinskaya E, Schweizer C, Nieuwenhuijsen MJ. Determinants of indoor air concentrations of PM_{2.5}, black smoke and NO₂ in six European cities (EXPOLIS study), *Atmospheric Environment*, 2006; 40: 1299-1313.
- Lee K, Yang W, Bofinger ND. Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposure in Australia, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2002; 50 (10): 1739-1744.
- Lipsett M. Cooking with gas? (don't) hold your breath!, *Journal of Environmental Medicine*, 1999; 1: 171-172.
- Monn C, Brandli O, Schindler C, Ackermann-Liebrich U, Leueberger P. SAPALDIA Team, *Science of the Total Environment*, 1998; 215: 243-251.
- Pershagen G, Rylander E, Norberg S, Eriksson M, Nordvall SL. Air pollution involving nitrogen dioxide exposure and wheezing bronchitis in children, *International Journal of Epidemiology*, 1995; 24 (6): 1147-1153.
- Sexton K, Letz R, Soengler JD. Estimation human exposure to nitrogen dioxide, *Environmental Research*, 1983; 32: 151-166.
- Sundell J. On the history of indoor air quality and health, *Indoor Air*, 2004; 14, 51-58.
- Wallace L. Indoor particles, *Journal of Air and Waste Management Association*, 1996; 46: 98-126.
- Yang W, Lee K, Yoon C, Yu S, Park K, Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2001; 21: 310-316.