

ORIGINAL ARTICLE

노출 시나리오를 이용한 대학생들의 유해 공기오염물질 노출 추정

김순신 · 홍가연 · 김동건 · 김성삼 · 양원호*

대구가톨릭대학교 산업보건학과

Estimating Personal Exposures to Air Pollutants in University Students Using Exposure Scenario

Sun-Shin Kim, Ga-Yeon Hong, Dong-Keon Kim, Sung-Sam Kim, Won-Ho Yang*

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Kyeongsan 712-702, Korea

Abstract

Studies evaluating the health effects of hazardous air pollutants assume that people's exposure to typical pollutant level is the same as specific regional pollutant level. However, depending on social and demographic factors, time-activity pattern of people can vary widely. Since most people live in indoor environments over 88% of the day, evaluating exposure to hazardous air pollutants is hard to characterize. Objective of this study was to estimate the exposure levels of university students of NO₂, VOCs(BTEX) and PM₁₀ using the scenarios with time-activity pattern and indoor concentrations. Using data from time-use survey of National Statistical Office in 2009, we investigated time-activity pattern of university students and hourly major action. A total of 1,057 university students on weekday and 640 on weekend spent their times at indoor house 13.04 hr(54.32%), other indoors 7.70 hr(32.06%), and transportation 2.36 hr(9.83%). Indoor environments in which university students spent their times were mainly house and school. Air pollutants concentrations of other indoor environments except house and school such as bar, internet cafe and billiard hall were higher than outdoors, indicating that indoor to outdoor ratios were above 1. According to three types of exposure scenarios, exposure to air pollutants could be reduced by going home after school.

Key words : Exposure assessment, Time activity pattern, Exposure model, Risk, Monte-carlo simulation

1. 서론

우리나라는 경제개발 계획 시행 후 급격한 산업화와 도시화에 따라 인간의 생활환경은 많은 변화가 이루어지고 있으며, 다양한 환경오염에 관한 문제가 대두되고 있다(Yang 등, 2008; Jeon 등, 2009). 공기, 물, 토양 등 인간이 살아가는 데 있어서 필수적인 여러 가

지 환경 인자 중 공기는 그 중에서도 가장 중요하다. 인간이 호흡하는 공기 중에는 공기를 구성하고 있는 필수적인 구성요소 이외에도 다양한 실내외 공기 오염물질이 혼재하고 있어, 호흡 시 함께 흡입함으로 인해 부정적인 건강 영향을 야기할 수 있다.

현대인의 대부분은 하루 중 약 88% 이상을 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 교통수단 등의 실내에

Received 23 August, 2012; Revised 12 November, 2012;

Accepted 14 January, 2013

*Corresponding author : Won-Ho Yang, Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea
Phone: +82-53-850-3739
E-mail: whyang@cu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 생활하고 있으며, 실내 공기 오염물질의 노출에 따른 건강위해성의 중요성이 높아지고 있다(Carlaw, 2007; Zipprich 등, 2002).

또한, 실내외 공기 오염물질의 개인노출은 단순히 대기 고정 측정망에 의해 측정된 것보다는 실내외 환경을 모두 고려하여 평가되어야 한다(Lai 등, 2004). 노출은 일반적으로 오염원과 인간사이의 접촉으로 정의될 수 있으며, 노출평가는 평가 대상 실내외 공기 오염물질에 대한 개인이나 집단의 환경에서 노출강도, 빈도 및 기간을 측정 또는 평가하는 과정이다(US EPA, 2007). 실내외 공기 오염물질에 대한 노출평가는 직접적 또는 간접적으로 결정될 수 있다. 직접적인 방법은 개인노출(personal monitoring) 또는 생물학적 모니터링(biological monitoring)이 있으며, 간접적인 방법은 대기 고정 측정망 자료나 국소환경의 측정 등을 통해 모델링(modeling)을 하는 방법이 있다(Nieuwenhuijsen 등, 2002; Yang 등, 2009).

실내외 공기 오염물질의 농도와 노출강도, 빈도 및 기간과 같은 변수들은 인간 활동에 영향을 받으며, 환경으로 유입된 실내외 공기 오염물질에 노출되기 전까지는 개인 또는 집단에 영향을 끼칠 수 없으므로 개인 또는 집단의 시간활동(time-activity)은 잠재적인 노출의 중요 변수이다(Woo 등, 2011). 실내 공기오염물질로 인한 건강영향을 보다 정확히 평가하기 위해서는 개인의 하루 24시간 활동양상에 따라 특정 오염물질에 노출되는 양을 측정하는 연구가 필요하며(Schwab 등, 1990), 실내 공기오염 물질 농도와 시간활동 양상을 이용할 경우 개인노출을 예측할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Noy 등, 1990). 인간의 시간활동 양상에 관한 연구는 다양한 환경 유해인자, 특히 실내외 공기 오염물질에 대한 노출을 평가하기 위한 위해도 관리의 측면에서 가장 중요한 부분이며, 노출평가 및 예측 모델에서 유용하게 적용될 수 있다(Liu 등, 2007; Sexton 등, 2007). 또한, 세계보건기구(WHO)는 인구집단의 실내외 공기 오염물질의 노출에 대한 건강영향 평가 시 모델링(modeling)을 주요 방법 중 한 가지로 인식하고 있으며, 시간활동 양상은 노출 모델링을 적용할 때 필수적인 요인이라고 보고하였다(WHO, 2000). 시간활동 양상은 계절, 날씨, 평일 또는 주말, 도시화 정도, 연령, 성별, 민족, 유전자 구성,

건강 상태, 비만도, 임신, 수입, 교육, 직장 유무, 직업의 종류, 개인 성향, 주택의 종류, 결혼 여부 등이 영향을 주는 것으로 알려져 있다(McCurdy와 Graham, 2003).

대학생은 다양한 학생 인구 집단 중 초, 중, 고등학교와 비교하여 수업이나 생활 양상이 다소 규칙적이지 못하기 때문에 그에 따른 시간활동 양상의 변동이 많을 것으로 예측된다. 그러나 대학생 인구집단에 대한 노출평가 연구는 매우 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 통계청의 2009년 생활시간 조사 자료를 이용하여 대학생 인구집단의 주요 생활환경과 시간활동 양상을 분석하고, 대구광역시에 거주하고 있는 30명의 대학생을 대상으로 2011년 9월과 2011년 12월에 각각 이산화질소(NO₂), 휘발성유기화합물(VOCs), 미세먼지(PM₁₀)를 대상자의 주택 실내외와 실외에서 측정하였다. 그리고 기타 실내환경인 강의실, 도서관, PC방, 음식점, 술집, 당구장에서 측정된 자료를 실측한 개인노출 농도와 노출 시나리오를 적용하여 몬테카를로 모의실험(Monte-Carlo simulation)을 통해 실내외 공기 오염물질에 대한 대학생들의 노출을 추정하고 노출분포를 비교 평가하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대학생의 시간활동 양상

통계청의 2009년 생활시간조사 자료(총 평일 24,256명, 주말 16,270명)를 이용하였으며, 평일 1,057명, 주말 643명, 총 1,700명의 대학생만을 추출하여 우리나라 대학생(재학생)들의 시간활동양상과 시간대별 활동 양상, 그리고 시간대별 주요 행위를 분석하였다(National Statistical Office, 2009). 또한, 대구광역시에 거주하고 있는 30명의 대학생을 대상으로 설문지와 시간활동 일지를 작성하도록 하였으며, 2009년 통계청의 시간활동 양상 결과와 비교 평가 하였다. 시간활동 일지의 형태는 기존의 연구에 사용된 일지를 참고하여 일부 수정하였으며, 시간에 해당되는 장소에 v 또는 ↓ 표시를 하도록 되어 있으며, 그 시간에 이루어진 주요 행동을 기록하도록 되어있다. 시간단위는 오전 6시(06:00)부터 오후 12시(24:00)까지는 30분이며, 오전 0시(00:00)부터 오전 6시(06:00)까지는 취침

시간을 고려하여 1시간 단위로 설정하였다(Byun 등, 2010; Lee 등, 2011).

2.2. 실내외 공기 오염물질의 측정 및 분석

2011년 9월(늦은 여름)과 2011년 12월(겨울)에 대구광역시에 거주하고 있는 30명의 대학생을 대상으로 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하여 4~5일간 각 대학생이 거주하고 있는 주택 실내와 실외에서 NO₂(Toyo Roshi Kaisha Ltd., Japan)와 VOCs(BTEX, OVM#3500, 3M, USA)를 측정하였으며, PM₁₀은 직독기(TSI SidePak AM510 Personal Aerosol Monitor, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 기타 실내 환경인 강의실, 도서관, PC방, 음식점, 술집, 당구장 등에서 VOCs(tenax-TA를 이용한 active sampling)와 PM₁₀을 실내외에서 측정하였으며, 지하철과 버스에서는 실내에서만 측정하였다. Tenax-TA의 유량은 0.2 L/min으로 30분간 1회 측정하였고, PM₁₀은 tenax-TA와 동일한 시간대에 측정하였다.

NO₂의 분석은 먼저 sulfanilic acid 5 g, phosphoric acid(85%) 50 mL와 NEDA(N(1-naphthyl) ethylene diamine dihydrochloride, 98%) 0.05 g을 이용하여 발색시약(color reagent) 1 L를 제조하였다. 그 다음 실리카겔과 활성탄을 연속으로 연결하여 공기를 챔버(chamber)로 유입시켜 실내외 공기 오염물질이 없는 상태, 즉 NO₂가 없는 상태의 클린룸(clean room)안에서 수동식 시료채취기를 분해하여 cellulose 필터를 시험관에 넣고 앞서 제조한 발색시약 10 mL를 시험관에 주입하여 밀봉한 후 발색하였다. 이 때 충분히 발색하기까지는 약 40분 가량이 소요되며, 발색된 시약을 UV-visible spectrophotometer(UV-1650, Shimadzu, Japan)로 545 nm에서 분석하였다(Yang 등, 2005).

VOCs(BTEX)의 분석은 이황화탄소(CS₂) 1.5 mL로 탈착하여 가스크로마토그래피(GC, Turbo Mass Gold, Perkin elmer, USA)로 분석하였고, 표준물질을 GC로 정량하여 검량선을 작성한 후 식 (1)을 사용하여 농도를 계산하였다. 검출한계(limit of detection, LOD)는 검출 가능한 표준용액을 이용하여 7회 분석 후 표준편차의 3배수(3×표준편차)로 하였다(Daisey 등, 1994). VOCs 중 목적 물질인 벤젠, 에틸벤젠, 톨루엔, 자일렌의 검출한계는 각각 0.34 ppb, 0.04 ppb,

0.04 ppb, 0.25 ppb 이었다.

$$C = \frac{WB}{rt} (\text{ppm}) \quad (1)$$

여기서, W: VOCs의 양(μg), B: 상수, r: 탈착효율, t: 측정시간(분)

Tenax-TA는 1차적으로 300°C에서 운반가스(He)에 의해 100 mL/min의 유량으로 15분간 열탈착 한 후 -10°C의 저온 응축트랩에서 농축된 후 320°C에서 2차 열탈착되어 GC/MS로 분석하였다. 그리고, TSI SidePak AM510 Personal Aerosol Monitor를 통해 측정된 PM₁₀의 농도 데이터는 data-logger에 의해 1분 단위로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대학생들의 시간활동 양상

통계청의 2009년 생활시간 조사에 따른 우리나라 대학생들의 시간활동 양상 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 우리나라 대학생 중 분석 대상 재학생은 평일 1,057명, 주말은 643명이었다. 평일 대학생은 1일 중 평균적으로 주택실내에서 13.04 hr(54.32%), 기타 실내 7.70 hr(32.06%), 실외 0.91 hr(3.78%), 이동 2.36 hr(9.83%) 가량의 시간을 보내는 것으로 나타났다. 주말은 평균적으로 주택실내에서 16.10 hr(67.07%), 기타 실내 2.01 hr(20.91%), 실외 1.08 hr(4.49%), 이동 1.81 hr(7.53%) 이었다. 우리나라 대학생들은 평일과 주말에 하루 중 대부분의 시간을 실내 환경에서 보내며, 실외활동은 낮은 것을 알 수 있다. 우리나라 전체 인구 중 31,634명의 다양한 인구집단을 대상으로 한 Yang 등(2011)의 연구 결과와 비교하였을 때 평일 주택 실내(14.23 hr), 이동(1.75 hr), 주말 주택 실내(16.13 hr), 이동(1.68 hr)으로 주택 실내 재실 시간은 비슷하였지만 평일 이동시간에서 약 한 시간가량의 차이를 보였다. 이러한 차이는 대학생의 경우 정규 수업이 규칙적이지 못하며, 다른 인구집단에 비해 자유분방한 행동 양상을 보이는 인구집단이므로 이동 시간에서 이러한 차이를 나타낸 것으로 생각된다.

Table 1. Time-activity pattern analysis of university students with time use survey of the Korea National Statistical Office

			M±S.D.	Sum (%)	Range	Interquartile range		
						25%	50%	75%
Weekday (n=1,057)	Indoor activity	Residential indoor	13.04±3.68 (54.32%)	86.38	0.0~24.00	10.33	12.67	15.17
		Other indoor	7.70±3.19 (32.06%)	0.0~22.50		5.67	7.83	9.90
	Outdoor activity	Residential outdoor	0.02±0.06 (0.08%)	3.78	0.0~0.60	0.00	0.00	0.00
		Other outdoor	0.89±0.72 (3.70%)	0.0~7.60		0.42	0.73	1.18
	Transport		2.36±1.36 (9.83%)	9.83	0.0~10.83	1.50	2.17	3.00
Weekend (n= 643)	Indoor activity	Residential indoor	16.10±4.83 (67.07%)	87.98	0.0~24.00	12.83	16.42	19.67
		Other indoor	5.01±3.89 (20.91%)	0.0~19.25		1.88	4.32	7.58
	Outdoor activity	Residential outdoor	0.04±0.10 (0.15%)	4.49	0.0~1.20	0.00	0.00	0.00
		Other outdoor	1.04±1.10 (4.34%)	0.0~8.87		0.35	0.75	1.40
	Transport		1.81±1.36 (7.53%)	7.53	0.0~9.00	0.83	1.5	2.50

위의 시간활동 양상 분석 결과를 바탕으로 평일과 주말에 대한 시간대별 활동 양상을 Fig 1과 Fig 2에 나타내었다. 평일의 이동 피크(peak)는 오전 7~10시 사이의 등교 시간과 오후 5~7시 사이의 하교 또는 귀가 시간에 나타났으며, 오후 5시 이후부터 9시 까지는 기타 실내 환경에서 시간을 보내는 양상을 보였다. 주말의 경우 평일과 비교하였을 때, 금요일 늦은 저녁부터 토요일 새벽까지 기타 실내 환경에서 시간을 보내는 양상을 보였으며, 이동은 오전 8시 30분부터 오후 10시까지 평일과 비슷한 양상을 나타내었다.

우리나라 대학생의 집안 및 집밖에서의 행동빈도 분석 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 집안에서 이루어지는 행동은 수면 56.48% 로 가장 높은 빈도를 나타내었으며, TV 시청 6.91%, 개인위생 5.58%, 학교 외에서의 스스로 학습 4.79%의 순으로 높은 빈도를 나타내었다. 집밖에서 이루어지는 행동은 수업이 34.73%로 가장 높은 빈도를 나타내었으며, 주업이 9.96%, 그 외 사람들과의 교제가 8.0%, 가족 외 사람들과의 식사가 7.16%, 유흥(술, 춤, 노래방)이 2.54%의 빈도를 나타내었다.

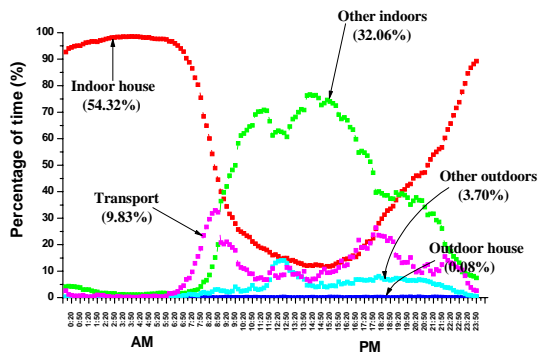


Fig. 2. Percentage of participants by the time of day in weekday (n=1,057).



Fig. 3. Percentage of participants by the time of day in weekend (n=643).

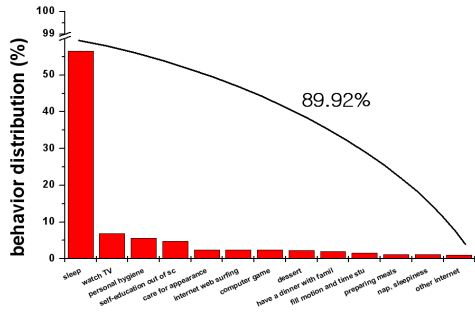


Fig. 4. Frequency of classified behavior in residential indoor of university students.

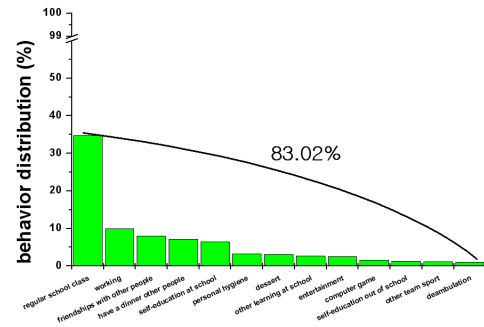


Fig. 5. Frequency of classified behavior in residential outdoor of university students.

개인노출 측정에 참여한 대학생들에 대한 4~5일 동안의 시간활동 양상을 Table 2에 나타내었다. 2009년 통계청의 생활시간 조사 결과와 다소 차이를 보이지만 대략적인 범위 내에서 비슷한 양상을 나타내었다. Table 1과 비교하였을 때, 늦은 여름의 경우 주택실내에 머무는 시간이 1.52 hr 감소하였으며, 이동시간은 0.46 hr 증가하였다. 이러한 결과는 연구에 참여한 대학생들의 경우 대구광역시에 거주하고 있지만 학교가 경북에 위치하고 있고, 대부분의 학생들이 통학을 한다는 점을 고려하면 차이가 있을 수 있다.

3.2. 실내외 공기 오염물질 농도

우리나라 대학생이 가장 많은 시간을 보내는 주요 실내 생활환경인 28개의 주택에서 2011년 9월(늦은 여름)과 2011년 12월(겨울)에 측정된 NO₂, VOCs (BTEX), PM₁₀의 농도를 Table 3에 나타내었다.

참여 대학생은 남학생이 13명, 여학생이 15명 이었으며, 겨울철에 3명이 불참한 관계로 새롭게 3명을 추가하여 늦은 여름과 겨울에 각각 28명의 대학생이 참여하였다. 참여 대학생들이 거주하고 있는 주택의 형태는 90%가 아파트였으며, 사용 중인 취사도구는 모

Table 2. Time-activity pattern analyses of university students in this study

			M±S.D.	Sum (%)	Range	Interquartile range			
						25%	50%	75%	
Summer (n= 28)	Indoor activity	Residential indoor	11.52±2.14 (48.16%)	80.06	8.62~16.42	9.75	11.50	12.94	
		Other indoor	7.63±2.65 (31.90%)	0.50~11.86					6.11
	Outdoor activity	Residential outdoor	0.43±0.58 (1.80%)	8.15	0.00~2.63	0.02	0.21	0.72	
		Other outdoor	1.52±1.59 (6.35%)	0.00~7.96					0.51
	Transport			2.82±1.10 (11.79%)	11.79	0.00~4.56	2.00	2.77	3.79
	Winter (n= 28)	Indoor activity	Residential indoor	14.78±3.30 (61.69%)	89.19	8.06~22.23	12.65	15.44	17.15
Other indoor			6.59±3.03 (27.50%)	0.83~12.38	4.75				
Outdoor activity		Residential outdoor	0.46±0.63 (1.92%)	4.80	0.00~3.20	0.00	0.41	0.55	
		Other outdoor	0.69±0.85 (2.88%)	0.00~3.80					0.00
Transport			1.44±1.13 (6.01%)	6.01	0.00~5.20	0.50	1.35	2.05	

Table 3. Air pollutants concentrations of residential indoors and outdoors

	Residential indoor (I)		Residential outdoor (O)		I/O	
	M±S.D. (GM)	Range	M±S.D. (GM)	Range		
Summer	NO ₂ (ppb)	20.60±5.73 (19.88)	5.73~39.87	24.55±6.60 (23.82)	12.38~50.37	0.89±0.27
	Benzene (ppb)	0.99±0.66 (0.73)	0.11~2.51	1.18±0.68 (0.94)	0.68~2.44	0.81±0.19
	Toluene (ppb)	5.91±2.61 (5.11)	2.47~11.95	6.79±6.19 (5.34)	0.61~34.43	0.92±5.45
	Ethyl- benzene (ppb)	0.75±0.55 (0.64)	0.31~2.90	1.13±1.99 (0.73)	0.35~11.03	1.08±0.89
	m, p- Xylene (ppb)	1.24±1.31 (0.91)	0.34~6.36	1.32±1.47 (0.88)	0.20~6.32	1.37±1.42
	PM ₁₀ (µg/m ³)	37.68±7.57 (36.94)	25.63~51.55	43.85±9.80 (42.72)	24.16~63.26	0.88±0.17
Winter	NO ₂ (ppb)	25.73±9.77 (24.02)	10.46~51.91	24.44±6.81 (23.19)	6.42~35.13	1.10±0.43
	Benzene (ppb)	0.61±0.21 (0.58)	0.29~1.23	0.62±0.17 (0.59)	0.27~1.11	1.02±0.29
	Toluene (ppb)	8.38±5.53 (6.85)	1.03~26.82	6.14±4.07 (4.83)	0.33~21.16	1.66±1.38
	Ethyl- benzene (ppb)	0.81±0.42 (0.72)	0.23~2.06	0.57±0.21 (0.53)	0.21~1.12	1.51±0.85
	m, p- Xylene (ppb)	1.69±1.12 (1.39)	0.42~4.87	1.03±0.40 (0.94)	0.23~2.14	1.75±1.38
	PM ₁₀ (µg/m ³)	48.10±13.57 (46.33)	28.99~77.48	60.18±15.88 (58.13)	35.19~89.56	0.81±0.14

두 가스레인지(gas range)를 사용하고 있었다.

늦은 여름에 측정된 NO₂의 주택실내의 평균 농도 비(I/O ratio)는 0.89±0.27을 나타내었다. NO₂의 I/O ratio는 실내 발생원이 없는 경우 0.5~0.6이며, 실내에 가스레인지 등의 발생원이 있는 경우는 0.8~1.2 사이의 값을 나타낸다. 이러한 점을 고려하면 주택실내 발생원이 있음을 알 수 있다(Yang 등, 2003). NO₂의 주택실외의 최고 농도는 50.37 ppb 이었으며, 24시간 대기 환경기준인 60 ppb를 초과하지 않았다. 벤젠의 주택실내의 농도비는 0.81±0.19로 1 이하의 값을 나타내었다. 벤젠의 주택실내의 평균 농도는 벤젠의 연간 대기환경기준인 1.5 ppb를 초과하지 않았으며, 주택실외의 농도가 주택실내보다 높은 값을 보였다. 일반적으로 VOCs의 농도는 실내가 실외보다 높게 나타난다

(Jang 등, 2007; Lee 등, 2010; Yoon 등, 2006). 그러나 본 연구에서는 측정 시기가 늦은 여름이므로 주택실내 환기량의 증가로 인한 농도 감소일 것으로 생각된다. 톨루엔은 벤젠과 비슷한 경향을 보였으나, 에틸벤젠과 자일렌의 주택실내의 농도비는 각각 1.08±0.89 및 1.37±1.42를 나타내어 주택실내의 농도가 더 높음을 알 수 있었다. PM₁₀의 주택실내 농도는 37.68±7.57 µg/m³ 이었고, 주택실외는 43.85±9.80 µg/m³, 그리고 주택실내의 농도비는 0.88±0.17 이었다.

겨울에 측정된 주택실내의 농도값은 대부분 늦은 여름에 측정된 농도값에 비해 벤젠을 제외한 나머지 물질의 농도가 다소 높은 경향을 나타내었으며, I/O ratio 역시 PM₁₀을 제외하고 모두 1 이상을 나타내어 실내 환경이 실외환경보다 높은 농도를 나타내었다.

Table 4. Measured air pollutants concentrations in other indoor environments

	NO ₂ (ppb)			Benzene (ppb)			Toluene (ppb)			Ethylbenzene (ppb)			m,p-Xylene (ppb)			PM ₁₀ (µg/m ³)			
	In door	Out door	I/O	In door	Out door	I/O	In door	Out door	I/O	In door	Out door	I/O	In door	Out door	I/O	In door	Out door	I/O	
Lecture room (n=5)	17.76 ±1.76	25.67 ±2.95	0.70 ±0.06	1.87 ±2.46	0.95 ±0.22	1.76 ±1.86	12.82 ±13.32	6.70 ±2.25	1.66 ±1.06	1.18 ±0.31	1.48 ±0.81	2.24 ±1.84	1.48 ±0.98	1.44 ±0.39	36.25 ±6.90	47.79 ±8.59	0.76 ±0.12		
Library & Cafeteria (n=5)	17.55 ±2.89	25.93 ±3.05	0.68 ±0.08	1.43 ±0.37	1.01 ±0.19	1.41 ±0.25	10.58 ±3.26	8.50 ±1.45	1.22 ±0.18	0.97 ±0.20	1.31 ±0.31	1.76 ±0.65	1.43 ±0.47	1.24 ±0.28	30.91 ±5.87	37.71 ±6.41	0.83 ±0.20		
Kataoke (n=5)	33.77 ±3.65	28.99 ±1.11	1.17 ±0.13	11.78 ±8.34	2.05 ±0.27	6.07 ±4.72	94.03 ±31.76	14.16 ±5.95	7.60 ±3.50	4.59 ±1.44	3.69 ±1.01	10.42 ±6.72	1.50 ±0.69	8.91 ±6.42	178.04 ±94.78	40.06 ±9.09	4.79 ±3.19		
Billiard hall (n=5)	29.84 ±3.93	26.67 ±1.95	1.12 ±0.10	5.01 ±1.15	1.96 ±0.36	2.68 ±0.97	47.05 ±32.35	14.70 ±4.87	3.16 ±1.45	3.62 ±1.66	1.47 ±0.51	9.69 ±10.21	2.27 ±1.25	4.92 ±4.05	139.72 ±49.00	56.20 ±13.60	2.58 ±1.04		
Bar (n=5)	33.79 ±5.98	29.23 ±2.69	1.15 ±0.12	18.53 ±18.76	2.03 ±0.84	8.69 ±5.91	52.01 ±38.11	17.53 ±4.32	3.17 ±2.30	5.59 ±3.09	1.55 ±0.37	14.09 ±9.54	2.20 ±0.81	6.56 ±4.23	294.70 ±107.03	57.80 ±16.11	5.55 ±2.36		
Restaurant (n=5)	37.10 ±6.45	30.29 ±5.11	1.23 ±0.16	5.32 ±1.86	2.53 ±0.62	2.10 ±0.54	37.14 ±37.40	20.39 ±7.18	1.68 ±1.34	2.44 ±1.05	2.01 ±0.63	2.28 ±1.49	2.25 ±1.26	1.13 ±0.53	116.01 ±40.76	69.83 ±12.00	1.69 ±0.56		
Cafe (n=5)	33.00 ±6.12	29.23 ±2.33	1.16 ±0.15	8.20 ±4.85	2.46 ±0.96	3.36 ±1.27	58.57 ±33.27	18.45 ±6.75	3.13 ±1.36	5.89 ±1.74	1.76 ±0.84	9.94 ±7.78	2.04 ±0.95	4.71 ±3.77	96.52 ±43.56	52.60 ±23.69	2.05 ±1.01		
Internet cafe (n=5)	40.06 ±8.88	34.26 ±3.38	1.16 ±0.15	10.66 ±5.30	2.36 ±0.78	4.29 ±1.00	80.97 ±31.57	16.34 ±5.62	5.12 ±1.49	7.21 ±1.94	1.95 ±0.60	10.85 ±6.43	1.56 ±0.56	6.72 ±3.36	593.07 ±183.04	47.99 ±12.00	13.38 ±6.00		
Subway (n=3)	25.72 ±3.08	N.A.	N.A.	6.41 ±1.16	N.A.	N.A.	61.52 ±11.51	N.A.	N.A.	2.10 ±0.50	N.A.	5.33 ±1.71	N.A.	N.A.	57.20 ±8.01	N.A.	N.A.		
Bus (n=3)	32.15 ±3.14	N.A.	N.A.	3.41 ±0.98	N.A.	N.A.	97.08 ±21.14	N.A.	N.A.	3.73 ±0.75	N.A.	8.68 ±3.20	N.A.	N.A.	94.62 ±8.26	N.A.	N.A.		

강의실, 도서관 및 구내식당, 노래방, 당구장, 술집 등 행동분류 빈도 분포 결과를 바탕으로 대학생들이 자주 머무는 기타 실내 환경의 실내외에서 측정된 실내외 공기 오염물질 농도를 Table 4에 나타내었다. 학교의 강의실 및 도서관을 제외한 대부분의 I/O ratio가 1을 초과하여 실내 발생원이 존재하고 있음을 알 수 있다. 강의실에서 측정된 PM₁₀의 농도는 Yang 등(2009)이 학교 건물에서 측정된 농도보다 많게는 약 3배가량 낮은 농도를 나타내었다. 이유는 대학생의 경우 유치원, 초, 중, 고등학생에 비해 강의시간이 일정하지 않고, 강의가 없을 경우 강의실이 비어있기 때문에 낮은 농도를 나타낸 것으로 사료된다. PM₁₀의 경우 흡연이 허용되는 PC방과 술집의 경우 24시간 대기환경 기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 심각한 노출이 이루어지고 있었으며, 발암성 물질인 벤젠의 농도 또한 대기환경기준인 1.5 ppb를 5~9배 초과하는 고농도를 나타내었다. 그 외의 다른 실내외 공기 오염물질도 고농도를 나타내었다. Yang 등(2011)에 의하면 한국인은

다른 서구에 비해 유흥관련 시설에서 보내는 시간이 상대적으로 많으므로 유흥관련 시설에 대한 실내 공기질의 개선 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다. 버스와 지하철 두 교통수단에서 측정된 NO₂ 농도는 다른 장소와 비슷하거나 낮은 농도이었고, 지하철 보다 버스에서 상대적으로 고농도를 나타내었다. Son 등(2004)의 택시 안에서 측정된 NO₂ 농도가 21.3 ppb(LPG), 34.4 ppb(Diesel)인 것을 고려해 볼 때 버스와 경유를 연료로 하는 택시에서 측정된 농도와 비슷한 수준을 나타내었다.

3.3. 노출 시나리오

2009년 통계청의 생활시간조사 자료를 이용한 행동분류 빈도분포 결과를 바탕으로 작성한 대학생들의 노출 시나리오 결과를 Table 5에 나타내었다. 대학생 인구집단의 주택 실내 및 주택 실외에서의 행동분류 빈도분포 결과 대학생들이 가장 많은 시간 동안 머무르는 국소환경과 이동을 모두 고려하여 노출 시나리오가 구성되도록 하였다. 노출 시나리오 I 은 집-이동

Table 5. Exposure scenario using time-activity pattern and activity for university student

Type	Time		Run time	Site(general)	Site(certain)
	Start	End			
Exposure scenario I	0:00	~ 8:00	8:00	Residential indoor	Home
	8:00	~ 9:00	1:00	Transport	Subway or bus
	9:00	~ 12:00	3:00	Other indoor	Lecture room
	12:00	~ 13:00	1:00	Transport & other indoor	Cafeteria
	13:00	~ 17:00	4:00	Other indoor	Lecture room
	17:00	~ 18:00	1:00	Transport	Subway or bus
	18:00	~ 0:00	6:00	Residential indoor	Home
Exposure scenario II	0:00	~ 8:00	8:00	Residential indoor	Home
	8:00	~ 9:00	1:00	Transport	Subway or bus
	9:00	~ 12:00	3:00	Other indoor	Lecture room
	12:00	~ 13:00	1:00	Transport & other indoor	Cafeteria
	13:00	~ 17:00	4:00	Other indoor	Lecture room
	17:00	~ 18:00	1:00	Transport & other indoor	Cafeteria
	18:00	~ 21:00	3:00	Other indoor	Library
21:00	~ 22:00	1:00	Transport	Subway or bus	
22:00	~ 24:00	2:00	Residential indoor	Home	
Exposure scenario III	0:00	~ 8:00	8:00	Residential indoor	Home
	8:00	~ 9:00	1:00	Transport	Subway or bus
	9:00	~ 12:00	3:00	Other indoor	Lecture room
	12:00	~ 13:00	1:00	Transport & other indoor	Cafeteria
	13:00	~ 17:00	4:00	Other indoor	Lecture room
	17:00	~ 19:30	2:30	Other indoor	Entertainment
	19:30	~ 20:30	1:00	Transport	Subway or bus
20:30	~ 24:00	3:30	Residential indoor	Home	

(차량 등교)-학교(강의)-이동(차량 하교)-집, 노출 시나리오 II는 집-이동(차량 등교)-학교(강의)-도서관-이동(차량 하교)-집, 노출 시나리오 III는 집-이동(차량 등교)-학교(강의)-음식점 등 유흥-이동(차량 귀가)-집 3가지로 작성하였다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7는 대학생의 노출 시나리오에 따른 실내 공기 오염물질(NO₂, PM₁₀, benzene)의 노출 분포를 나타내었다. 대학생 노출 시나리오에서 각 실내 환경에서의 실내 공기오염물질 농도는 본 연구에서 측정된 실측값을 적용하였다. 농도값은 대학생 인구 집단의 시간활동을 고려하여 차량에서의 측정은 등하교 시간대에 측정하였고, 강의실에서의 측정은 강의시간과 동일한 시간대에 측정하였다. 노출 시나리오 작성 후 각 실내 환경의 농도를 시간가중평균 모델에 적용하였다. 시간가중평균(TWA)에서 대상 실내 공기 오염물질의 농도는 대수정규분포로 가정하였으며, 각 국소환경에 머무는 시간은 정규분포로 가정하여 @Risk software(ver. 6, Palisade Co.)를 이용하여 1,000,000번 몬테카를로 모의실험을 하였다(Smith, 1994).

몬테카를로 모의실험 결과에 따르면 대학생들이 강의 후 유흥과 관련된 실내환경에 머무르지 않고 바로 귀가하거나 도서관에서 공부 후 집에 가는 것이 실내 공기 오염물질의 노출을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 대학생들이 정규 수업 후 주로 머무는 유흥 관련 실내환경에 대한 실내 환기량의 증가와 같은 공학적 대책 또는 주요 실내 공기 오염물질에 대한 노출기준 설정 등의 정책적인 대책이 강구되어야 할 것으로 생각된다.

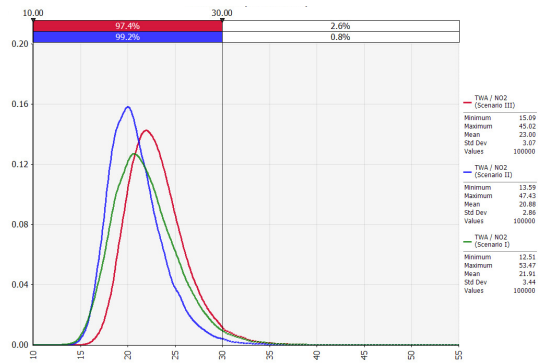


Fig. 6. Exposure distribution of university students by NO₂ (ppb) exposure scenario.

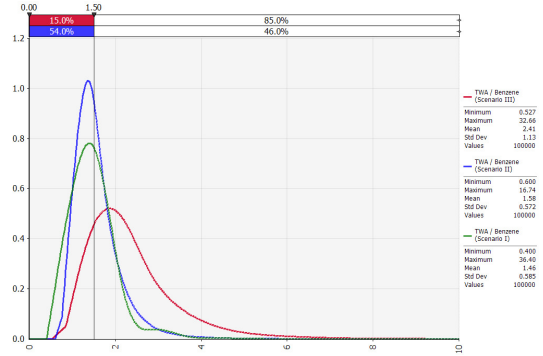


Fig. 7. Exposure distribution of university students by Benzene (ppb) exposure scenario.

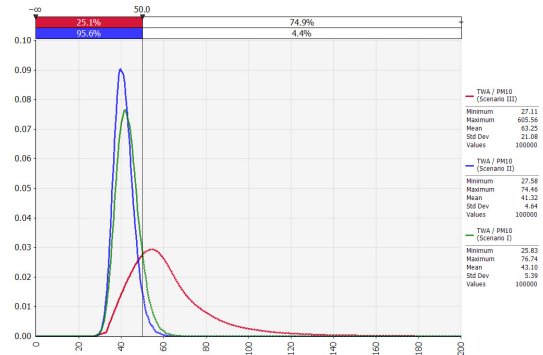


Fig. 8. Exposure distribution of university students by PM₁₀ (µg/m³) exposure scenario.

4. 결론

본 연구에서는 2009년 통계청의 생활시간 조사 자료를 이용한 우리나라 대학생들은 평일과 주말의 시간활동 양상 결과에서 우리나라 대학생들은 하루 중 대부분의 시간을 실내 환경에서 보내며, 실외활동은 적은 것으로 나타났다. 집안 및 집밖에서의 행동분류 빈도분석 결과, 집안에서 이루어지는 행동은 수면이 56.48%로 가장 높은 빈도를 나타내었으며, 집밖에서는 수업이 34.73%로 가장 높은 빈도를 나타내었다. 늦은 여름에 측정된 NO₂의 주택 실내의 최고농도는 24 시간, 연간 대기환경 기준치를 초과하지 않았으며, 주택 실외의 농도가 주택실내보다 높은 값을 보였다. 벤젠의 주택실내의 평균 농도는 벤젠의 연간 대기환경 기준인 1.5 ppb를 초과하지 않았으며, 주택실외의 농

도가 주택실내보다 높은 값을 보였다. 톨루엔은 벤젠과 비슷한 경향을 보였으나, 에틸벤젠과 자일렌의 주택실내외 농도비는 각각 1.08 ± 0.89 및 1.37 ± 1.42 를 나타내어 주택실내외의 농도가 더 높음을 알 수 있었다. 노출 시나리오를 이용한 대학생의 노출분포에서는 대학생들이 강의 후 유흥과 관련된 실내 환경에 머무르지 않고 바로 귀가하거나 도서관에서 공부 후 귀가하는 것이 실내 공기 오염물질의 노출을 최소화 할 수 있을 것으로 나타났다. 따라서 실내외 공기 오염물질의 농도가 상대적으로 높았던 PC방, 당구장, 술집 등에서의 재실시간을 줄이는 등의 개인적인 대책과 대상 실내환경에 대한 공학적, 행정적인 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

모델링 기법에 개인노출과 시간활동양상을 이용할 경우 각 국소환경의 실내 공기 오염물질 농도 수준을 예측할 수 있었으며, 다양한 인구집단과 모델링 기법을 이용한 개인노출 예측 및 평가에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(NRF 2011-0010197).

참 고 문 헌

- Byun, H. J., Ryu, K. N., Jang, K. G., Bae, H. J., Kim, D. J., Shin, H. S., Chu, J. M., Yoon, C. S., 2010, Socioeconomic and Personal Behavioral Factors Affecting Children's Exposure to VOCs in Urban Areas in Korea, *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 524-535.
- Carslaw, N., 2007, A new detailed chemical model for indoor air pollution, *Atmospheric Environment*, 41, 1164-1179.
- Jang, S. K., Chun, J. Y., Lee, T. Y., Lim, S. G., Lu, J. M., Seo, S. Y., Lim, J. Y., 2007, Characteristics of concentration distribution for indoor air pollutants (VOCs and Carbonyl compounds) in new apartments, *Analytical Science & Technology*, 20(1), 17-24.
- Jeon, Y. T., Yang, W. H., Cho, T. J., Son, B. S., 2009, Personal exposure level of nitrogen dioxide in an industrial area, *Korean Journal of Environmental Health*, 35(1), 11-20.
- Kim, S. S., Hong, G. Y., Kim, D. K., Hwang, S. R., Woo, B. L., Ahn, H. G., Yang, W. H., 2012, Assessment of nicotine concentration of passive smoking in indoor environments of entertainment facilities in Kyungbuk, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 9(1), 53-64.
- Lee, H. S., Kwon, E. K., Woo, B. L., Son, B. S., Yang, W. H., 2010, Indoor and Outdoor levels of Houses for VOCs and NO₂ in Industrial Complex Area and Agricultural Area, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 7(4), 205-215.
- Lee, L. K., Kang, T. S., Ham, S. H., Kim, H. I., Yang, Y. S., Yoon, C. S., 2011, Noise Exposure according to the Time Activity Pattern and Duties of Firefighters, *Journal of Environmental Health Sci*, 37(2), 94-101.
- Liu, W., Zhang, J., Korn, L. R., Zhang, L., Weisel, C. P., Turpin, B., Morandi, M., Stock, T., Colome, S., 2007, Predicting personal exposure to airborne carbonyls using residential measurements and time/activity data, *Atmospheric Environment*, 41(25), 5280-5288.
- McCurdy, T., Graham, S. E., 2003, Using human activity data in exposure models: Analysis of discriminating factors, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 13, 294-317.
- National Statistical Office, 2009, Time-use Survey, Korea.
- Nieuwenhuijsed, M., Parstenbach, D., Duarte-Davidson, R., 2006, New developments in exposure assessment: impact on the practice of health risk assessment and epidemiology studies, *Environment International*, 32, 996-1009.
- Noy, D., Brunekreef, B., Boleij, J. S., Houthuijs, D, De Koning, R., 1990, The assessment of personal exposure to nitrogen dioxide in epidemiological studies, *Atmospheric Environment*, 24(12), 2903-2909.
- Schwab, M., Steven, D. C., Spengler, H. D., Ryan, P. B., 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.
- Sexton, K., Mongin, S. J., Adgate, J. L., Pratt G. C., Ramachandran, G., Stock T. J., Morandi, M. T., 2007, Estimating volatile organic compound concentrations in selected microenvironments using time-activity and personal exposure data, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70, 465-476.
- Smith, R. L., 1994, Use of monte carlo simulation for human exposure assessment at a superfund site. *Risk analysis*, 14(4), 433-439.
- Son, B. S., Yang, W. H., Breyse, P., Chung, T. W., Lee, Y. S., 2004, Estimation of occupational and nonoccupational nitrogen dioxide exposure for Korean taxi drivers using a microenvironmental model, *Environmental Research*, 94(3), 291-296.
- US . EPA(US Environmental protection Agency), 1997, Exposure factor Handbook I, General factor, EPA/600/P95/002Fa, Washington DC.
- WHO(World Health Organization), 2000, WHO Guideline for air quality, WHO/SED/OEH, Geneva.
- Woo, B. L., Kim, D. K., Lee, H. S., Son, B. S., Hwang, M. Y., Park, C. H., Yu, S. D., Yang, W. H., 2011, Estimation of microenvironmental nitrogen dioxide concentration using time activity pattern and personal exposure profile, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 8(1), 53-61.
- Yang, W. H., Lee, K. Y., Yoon, C. S., Yu, S. D., Park, K. H., Choi, W. H., 2011, Determinants of residential indoor and transportation activity time in Korea, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 21, 310-316.
- Yang, W. H., Sohn, J. R., Kim, J. H., Son, B. S., Park, J. C., 2009, Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, *Journal of Environmental Management*, 90, 348-354.
- Yang, W. H., Lee, K. Y., Park, K. H., Yoon, C. S., Son, B. S., Jeon, J. M., Lee, H. S., Choi, W. H., Yu, S. D., Han, H. S., 2009, Microenvironmental time activity patterns of weekday and weekend on korean, *Journal of Korean Society for Indoor environment*, 6(4), 267-274.
- Yang, W. H., Im, S. G., Son, B. S., 2008, Indoor, outdoor, and personal exposure to nitrogen dioxide comparing industrial complex area with country area, *Journal of Environmental Science*, 34(3), 183-187.
- Yang, W. H., Son, B. S., Sohn, J. R., 2005, Estimation of source strength and deposition constant of nitrogen dioxide using compartment mode, *Korean Journal of Environmental Health*, 31(4), 260-265.
- Yoon, C. S., Choi, I. J., Ha, K. C., Park, D. W., Park, D. Y., 2006, Relationships of TVOC with Several Aromatic Hydrocarbon Constituents at Preschool Facilities, *Korean Journal of Environmental Health*, 32(5), 404-411.
- Zipprich, J. L., Harris, S. A., Fox, J. C., Borzelleca, J. F., 2002, An analysis of factors that influence personal exposure to nitrogen oxides in residents of Richmond, Virginia, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12(4), 273-285.