

Monte-Carlo 모의실험을 통한 부분 인구집단별 벤젠 및 PM₁₀의 노출 및 위해성 평가

박진현* · 양소영** · 박윤경* · 류현수* · 김은채* · 최영태* · 허정* · 조만수* · 양원호*†
*대구가톨릭대학교 산업보건학과, **경북대학교 에너지공학부

Exposure and Risk Assessment of Benzene and PM₁₀ for Sub-populations using Monte-Carlo Simulations

Jinhyeon Park, So Young Yang**, Yunkyung Park*, Hyeonsu Ryu*, Eunchoe Kim*,
Youngtae Choe*, Jung Heo*, Mansu Cho*, and Wonho Yang*†

*Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

**School of Energy Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT

Objectives: The Korea Ministry of Environment regulates concentrations of hazardous air pollutants (HAPs) through Atmosphere Environmental Standards to protect public health from HAPs. However, simply determining the exceedance of HAP concentrations has several limitations and more comprehensive assessment is required. In addition, integrated risk assessment is needed considering exposure in all microenvironments, including outdoor as well as indoor environments. The purpose of this study was to assess the differences in risk by sub-population groups according to time-activity patterns and reported concentrations, as well as the lifetime risk for Koreans.

Methods: In this study, we calculated time-weighted average exposure concentrations for benzene and PM₁₀ among preschool-age children, students, housewives, workers, and the elderly using residential time and concentrations for indoor (house, school or workplace, other), outdoor, and transport by the meta-analysis method. The risk assessments were conducted by excess cancer risk and disease death risk using 1,000,000 Monte-Carlo simulations for probabilistic analysis.

Results: Preschool-age children, students, housewives, workers, and the elderly spent 91.9, 86.0, 79.8, 82.2, and 77.3% of their day in their house, workplace, or school, respectively. The more than 99% excess cancer risk for benzene exceed 1.0E-06 in all sub-populations and lifetime. The acute disease death risk for PM₁₀ for housewives and workers for lifetime were 3.35E-04 and 3.18E-04, and chronic disease death risks were 2.84E-03 and 2.70E-03, respectively.

Conclusions: The risk of benzene and PM₁₀ by sub-population group and for the lifetime of housewives and workers were assessed. Benzene showed risky results for this study. All disease death risks of PM₁₀ were higher than 1.0E-04 and showed different risks by sub-population. This study can be used as a basis for lifetime exposure and risk assessment to benzene and PM₁₀.

Key words: Hazardous air pollutant, meta-analysis, Monte-Carlo analysis, exposure assessment, risk assessment

†Corresponding author: Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, Hayang-ro 13-13, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38430, Republic of Korea, Tel: +82-53-850-3739, E-mail: whyang@cu.ac.kr
Received: 4 June 2019, Revised: 18 June 2019, Accepted: 20 June 2019

I. 서 론

최근 대기 중 미세먼지 농도가 증가함에 따라 대기 오염과 이로 인한 건강영향에 대한 대중의 관심이 높아지고 있다. 환경부에서는 공기오염물질에 의한 환경성 질환을 방지하기 위하여 환경기준에서 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃), 납(Pb), 벤젠 등을 규제하고 있다.¹⁾ 이 중 PM₁₀과 벤젠은 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 인간에게 암을 일으키는 것으로 확인된 1군 발암물질로 분류되어 있고, 흡입에 의하여 건강 악영향이 흔하게 보고되는 공기오염물질로 알려져 있어 이들 물질에 대한 건강위해성 연구가 많이 진행되고 있다.^{2,3)}

벤젠은 휘발성이 강한 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)의 한 종류로 자연적으로도 발생할 수 있지만 원유, 일상생활에서 접하는 음식물, 화장품 등에 함유되어 있으며, 제조업(주조, 도장, 접착, 세척, 표면처리 등), 건설업, 운수업, 서비스업 등 다양한 산업에서 활용하고 있다.⁴⁾ 낮은 농도에서도 장기간 노출되면 인체에 영향을 주어 백혈병과 다발성 골수종을 유발하고 급성 흡입 및 고농도로 구강 노출 시 사망을 일으키는 것으로 알려져 있어 실내의 환경에서 벤젠의 검출은 매우 민감한 사안 중의 하나로 부각되어 있다.⁵⁾

PM₁₀은 다양한 화학물질의 집합체로 실내에서는 인간의 활동, 주방 조리, 난방기구의 연소, 실내흡연, 실내 쌓여 있는 먼지의 비산 등에 의해 발생되며, 실외에서는 토양, 황사, 연료연소, 산업현장 배출가스, 자동차 배기가스, 흡연(담배연기)등에서 발생된다.⁶⁾ 또한 PM₁₀은 호흡기질환 및 심혈관질환뿐만 아니라 중추신경계 장애, 미숙아 출산률 증가, 대사성 질환, 악성 종양 및 정신 질환의 증가 등 다양한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾

사람은 대부분의 시간을 실내에서 보내기 때문에,⁸⁾ 이러한 공기오염물질에 대한 위해성 평가는 주로 실내에 국한되어 있다.⁹⁾ 그러나 공기오염물질에 대한 위해성을 평가할 때는 실외를 포함한 모든 국소환경에서의 노출을 고려한 통합 위해성 평가가 필요하다.¹⁰⁾

좀 더 정확한 공기오염물질에 대한 건강영향을 분

석하기 위해서는 인구집단별 하루 24시간 중 활동 행태에 따른 특정 오염물질의 노출 및 위해성 평가가 진행되어야 한다.¹¹⁾ 거주공간(집)을 제외하고 학생은 학교, 직장인은 직장, 노인층은 민감시설(노인 시설, 병원) 등이 주된 생활환경으로 인구집단에 따라 공기오염물질에 대한 노출환경이 다르기 때문에 유해인자에 대한 노출도 달라지게 된다.

본 연구에서는 대기환경기준에서 제시하는 공기오염물질 중, 최근 노출 연구 보고사례가 적은 SO₂, Pb, CO, 선행연구가 이루어진 NO₂와 O₃를 제외하고¹²⁾ IARC의 1군 발암물질로 분류된 PM₁₀과 벤젠을 대상으로 위해성 평가를 진행하였다. 지난 10년 동안의 실내의 환경에서 측정된 농도를 고찰 및 시간활동 양상이 유사할 것으로 추측되는 집단에 적용하여 부분 인구집단의 시간활동 양상에 따른 노출 및 위해성의 차이와 사람의 전 생애에 걸친 노출 및 위해성을 평가하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 인구집단별 노출 평가

본 연구에서는 시간활동 양상이 유사한 집단으로 가정되는 미취학 아동, 학생, 전업주부, 직장인(사무직 근로자), 노년층 총 5개의 부분 인구집단을 대상으로 벤젠과 PM₁₀에 대한 노출 및 위해성 평가를 실시하였다.

각 인구집단이 머무르는 국소환경을 집, 학교 또는 직장, 실외, 이동 수단, 기타 실내의 5개의 국소환경으로 구분하였으며, 인구집단의 특성에 따라 방문하는 국소환경을 구분하여 노출 시나리오를 구상하였다. 학교 또는 직장은 어린이집 및 보육시설(미취학 아동), 학교(학생), 직장(직장인)으로, 기타 실내는 식당(음식점, 카페), 주점, 쇼핑몰, 문화시설, 체육단련실, 의료기관, 학원, 노인복지시설의 세부 국소환경으로 나누어 각 인구집단에 해당하는 국소환경의 농도를 산출하였다(Table 1).

각 국소환경의 농도는 메타분석을 통해 각 국소환경에서의 실측 데이터를 산출하였다. Dbpia, Science Direct, Google Scholar와 같은 학술검색 엔진에서 air pollutants, risk assessment, exposure assessment 등과 같은 주요어(key words)를 사용하여 2018년 12월 21일까지 최근 10년간의 대기 중 농도에 대하여

Table 1. Exposure scenario by population group

Population group	School or workplace						Other places							
	House	Work-place	School	Daycare center	Outdoor	Transport	Restaurant, cafe	Bar	Mall	Cultural facility	Gym	Medical center	Private educational institute	Senior citizen center
Preschool child	√			√	√	√				√			√	
Student	√		√		√	√				√			√	
Housewife	√				√	√	√	√	√	√	√	√		
Worker	√	√			√	√	√	√	√	√	√	√		
The old	√				√	√	√			√		√		√

문헌고찰을 실시하였으며 각 국소환경에서 측정된 표본의 수와 농도를 이용하여 가중 산술 평균(weighted arithmetic mean) 농도를 계산하였다.

문헌조사 결과, 총 70개의 문헌이 도출되었으며, 실측한 연구가 아닌 리뷰 논문이나 학술대회 초록, 환경 시료 측정(environmental sampling)이 아닌 개인 시료 측정(personal sampling) 등의 조건에 부합하지 않는 문헌 24개를 제외하고 46개의 문헌을 대상으로 하였다. 조사된 자료는 벤젠은 25개의 문헌에서 3,719개,^{2,11,14-36} PM₁₀은 25개의 문헌에서 3,658개를^{3,32-55} 산출하였다.

각 국소환경에서의 체실시간은 통계청의 생활시간 조사 자료를 기반으로 한 기존의 시간활동 양상을 평가한 문헌을 참고하였으며,^{11, 56-59} 이때, 생활시간 조사자료는 전업주부 및 직장인은 2009년의 자료를 영유아, 학생, 노년층은 2014년의 자료를 바탕으로 조사되었다. 인구집단에 따른 노출 농도는 각 국소환경별 체실시간에 따른 시간 가중 평균(time-weighted average) 농도를 적용하였다(식 (1)).⁶⁰

Time-weighted average concentration

$$= \frac{\sum_{i=1}^n t_i c_i}{n} \tag{1}$$

where, t=time spent in microenvironment (hr), c= concentration of air pollutant in microenvironment

2. 건강 위해성 평가

본 연구에서는 발암물질인 벤젠의 위해도 계산을

위하여 흡입 단위 위해도(inhalation unit risk, IUR) (식 (2))를 이용하였으며, 단일물질이 아닌 혼합물질인 PM₁₀의 경우에는 일반 규제물질로 분류하여 단위 사망률(unit death rate)을 이용한 위해성 평가 방법인 ExternE. 연구의 사망 위해성 평가 방법을 적용하였다(식 (3)).⁶¹

Excess cancer risk

$$= \text{Exposure concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Inhalation unit risk } (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1} \tag{2}$$

Disease death risk

$$= \text{Exposure concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Unit death rate } (\% \text{ death rate change}/(\mu\text{g}/\text{m}^3)) / \text{Exposure duration (year)} \tag{3}$$

이때, 발암성 물질인 벤젠의 IUR은 EPA (United States Environmental Protection Agency)에서 제공하는 7.8E-06 (μg/m³)⁻¹를 적용하였으며,⁶² PM₁₀은 ExternE 연구에서 제시된 단위 사망률을 적용하였다. 이때, 급성과 만성 단위 사망률로 나누어 급성 단위 사망률은 0.046%/(μg/m³)⁻¹을, 만성 단위 사망률은 0.39%/(μg/m³)⁻¹을 적용하였다.^{61,63}

추가적으로, 5개의 부분 인구집단에 영유아를 추가하여 사람의 전 생애에 대한 노출 및 위해성 평가를 진행하고자 하였다. 이때 영유아는 3세 미만, 미취학 아동은 만 3세~6세, 학생은 만 7세~18세, 전업주부는 만 19세~64세 여성, 직장인은 만 19세~64세 성인, 노년층은 만 65세 이상으로 정의하여 연령에 따른 전 생애 평가를 진행하였다. 영유아는 집에서만 시간을 보낸다고 가정하여 집에서의 농도를 노

출 농도로 적용하였고, 따라서 노출 평가는 진행하지 않았으며, 노출 농도는 평생 동안 같은 농도에 노출된다고 가정하였다. 전 생애 평가는 전업 주부 및 직장인의 2가지의 생애를 가정하였다. 사람이 태어나 만 18세까지는 동일하게 영유아, 미취학 아동, 학생의 생애를 거치고, 만 19세부터 64세까지 전업 주부와 직장인의 생애를 보내며, 만 65세 이후로는 노년층의 생애를 보낸다고 가정하였다. 만 65세 이후인 노년층의 노출 기간은 2018년 기준 여성의 기대수명인 85.7년과 남녀의 기대수명인 82.7년을 각각 전업주부 생애와 직장인 생애에 적용하였다.⁶⁴⁾

또한 위해성 평가에서 단일 값(fixed point mean) 뿐만 아니라 @Risk (Palisade Co., USA) 소프트웨어를 사용하여 확률 분포를 이용한 Monte-Carlo 모의실험을 통하여 확률론적 위해성 평가를 실시하였다. 공기 오염물질의 농도는 대수정규분포를 적용하였으며 국소환경별 재실시간은 정규분포를 적용하였고, 각 1,000,000번의 모의실험을 통해 분석하였다. 확률론적 분석을 통하여 인구집단 및 전 생애 위해성 평가에서 초과발암 위해도가 1.0E-06을 초과하는 비율을 제시하고, PM₁₀에 의한 만성 및 급성 질병 사망 위해도의 분포를 제시하고자 하였다.

III. 연구 결과

1. 인구집단별 노출 평가

시간활동 양상의 문헌고찰을 통해 조사한 인구집단에 따른 국소환경에서의 재실시간을 Table 2에 나타내었다. 가장 많이 머무는 국소환경은 집이었으며, 집에서 보내는 시간은 전업주부가 19.15±3.31 hr로 가장 높았고, 노년층이 18.55±3.71 hr, 미취학 아동

이 16.14±2.57 hr, 학생이 12.83±2.36 hr, 직장인이 11.67±1.88 hr로 나타났다. 학교 또는 직장의 경우 직장인은 직장에서 8.06±5.12 hr, 학생은 학교에서 7.82±2.36 hr, 미취학 아동은 어린이집 및 보육시설에서 5.91±2.67 hr를 보낸 것으로 나타났다. 실외에서 보낸 시간은 노년층이 2.44±1.73 hr, 전업주부가 1.25±0.50 hr, 직장인은 0.95±1.08 hr, 학생 0.80±0.62 hr, 미취학 아동 0.53±1.13 hr였다. 이동수단에서 보낸 시간은 직장인, 학생, 노년층, 전업주부, 미취학 아동 순으로 각각 1.49±1.09, 1.37±0.74, 1.36±1.00, 1.29±1.27, 1.04±1.10 hr로 나타났다. 기타 실내에서 보낸 시간은 전업주부가 2.42±2.42 hr, 노년층이 2.09±1.56 hr, 학생 1.80±1.70 hr, 직장인 1.28±1.20 hr, 미취학 아동이 0.63±1.15 hr로 나타났다.

메타분석을 통해 가중 산술 평균을 적용한 각 국소환경의 농도를 Table 3에 나타내었다. 벤젠의 경우 집에서의 농도는 2.76±2.77 µg/m³로 나타났으며, 어린이집 및 보육시설은 5.13±2.97 µg/m³, 학교는 5.79±7.64 µg/m³, 직장 5.78±11.9 µg/m³로 나타났다. 실외는 5.16±4.74 µg/m³, 이동수단은 5.38±3.68 µg/m³로 나타났다. 기타 실내는 미취학 아동과 학생은 8.27±7.82 µg/m³, 가정주부와 직장인은 7.04±7.14 µg/m³로 나타났으며, 노년층은 4.99±3.89 µg/m³로 나타났다.

PM₁₀의 농도는 집에서 53.14±17.85 µg/m³, 어린이집 및 보육시설에서 72.82±38.67 µg/m³, 학교 72.5±39.06 µg/m³, 직장 62.84±13.16 µg/m³으로 나타났으며, 실외는 76.20±22.67 µg/m³, 이동수단 94.32±41.88 µg/m³으로 나타났다. 기타실내는 미취학 아동과 학생은 60.25±33.78 µg/m³, 전업주부 및 직장인은 55.09±33.78 µg/m³, 노년층은 54.39±24.20 µg/m³으로 나타났다.

Table 2. The time spent in each microenvironment by sub-population groups

Population group	The time spent in each microenvironments (hr)										Reference
	House		School or workplace		Outdoor		Transport		Other places		
	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	
Preschool child	16.14	2.57	5.91	2.67	0.53	1.13	1.04	1.10	0.63	1.15	NIER, 2016
Student	12.83	2.36	7.82	2.36	0.80	0.62	1.37	0.74	1.80	1.70	Ryu et al., 2018
Housewife	19.15	3.31	-	-	1.25	0.5	1.29	1.27	2.42	2.42	Lee et al., 2014
Worker	11.67	1.88	8.06	5.12	0.95	1.08	1.49	1.09	1.28	1.20	Yang et al., 2012
The old	18.55	3.71	-	-	2.44	1.73	1.36	1.00	2.09	1.56	NIER, 2017

Table 3. The concentrations of air pollutants in each microenvironment according to sub-population groups using meta-analysis

Air pollutants	Population group	Microenviroments									
		House		School or workplace		Outdoor		Transport		Other places	
		Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
Benzene (µg/m ³)	Preschool child	2.76	2.77	5.13	2.97	5.16	4.74	5.38	3.68	8.27	7.82
	Student	2.76	2.77	5.79	7.64	5.16	4.74	5.38	3.68	8.27	7.82
	Housewife	2.76	2.77	-	-	5.16	4.74	5.38	3.68	7.04	7.14
	Worker	2.76	2.77	5.78	11.9	5.16	4.74	5.38	3.68	7.04	7.14
	Senior	2.76	2.77	-	-	5.16	4.74	5.38	3.68	4.99	3.89
PM ₁₀ (µg/m ³)	Preschool child	53.14	17.85	72.82	38.67	76.20	22.67	94.32	41.88	60.25	33.78
	Student	53.14	17.85	72.50	39.06	76.20	22.67	94.32	41.88	60.25	33.78
	Housewife	53.14	17.85	-	-	76.20	22.67	94.32	41.88	55.09	25.85
	Worker	53.14	17.85	62.84	13.16	76.20	22.67	94.32	41.88	55.09	25.85
	Senior	53.14	17.85	-	-	76.20	22.67	94.32	41.88	54.39	24.20

2. 건강 위해성 평가

벤젠, PM₁₀의 인구집단 및 전업주부, 직장인 생애 위해성 평가 결과를 Table 4에 나타내었다, 벤젠의 경우, 학생의 평균 초과 발암 위해도는 3.48E-05로 가장 높게 나타났으며, 직장인은 3.26E-05, 미취학 아동이 2.87E-05, 전업주부와 노년층이 2.71E-05와 2.65E-05로 나타났다. 전업주부 생애는 3.11E-05로 나타났으며, 직장인 생애는 2.79E-05로 나타났다. 초과 발암 위해도의 확률 분포를 보았을 때, 모든 인구집단과 생애에서 99% 이상의 초과 발암 위해도가 1.0E-06을 초과한 것으로 나타났다.

PM₁₀의 급성 및 만성 평균 질병 조기 사망 위해도 는 학생이 3.59E-04 및 3.04E-03으로 가장 높게 나타났으며, 미취학 아동이 3.39E-04 및 2.88E-03으로 나타났다(Table 4). 노년층은 3.28E-04와 2.78E-03, 직장인이 3.27E-04, 2.77E-03으로 나타났고, 전업주부가 3.06E-04 및 2.59E-03으로 나타났다. 전업주부의 생애는 각각 3.35E-04와 2.84E-03으로 나타났으며, 직장인의 생애는 3.18E-04, 2.70E-04로 나타났다.

IV. 고 찰

벤젠에 대한 위해성이 가장 높은 인구집단은 학생, 직장인, 미취학 아동, 전업주부, 노년층 순으로 나타

났다. 집, 실외, 이동수단의 농도가 같은 점을 고려 하였을 때, 학생 학교의 벤젠 농도가 5.79 µg/m³, 기타 실내에서의 농도가 8.27 µg/m³로, 각 국소환경에서 가장 높은 농도에 노출되기 때문인 것으로 생각 할 수 있다. 학생 다음으로 벤젠에 대한 위해성이 높은 인구집단은 직장인으로 나타났는데, 집을 제외 하고 가장 많은 시간을 보내는 국소환경인 직장에서의 농도가 5.78 µg/m³로 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 벤젠에 대한 위해성 평가 결과, 발암 초과 위해도의 확률 분포상에서 99% 이상이 1.0E-06을 초과한 것으로 나타나, 거의 모든 사람이 벤젠에 의해 건강 악영향을 입을 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 벤젠의 IUR이 7.8E-06 (µg/m³)⁻¹으로, 벤젠에 의한 건강 악영향을 입을 가능성이 높을 수 있음을 의미한다. 을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 평균 초과 발암 위해도 는 학생, 직장인, 미취학 아동, 전업주부와 노년층 순으로 높게 나타났다.

환경부에서 국가모니터링 자료만을 활용하여 벤젠의 초과 발암위해도를 중심경향적 노출량 산출법 (central tendency exposure)과, 합리적 최대노출량 산출법(reasonable maximum exposure)으로 산출한 결과, 각각 2.92E-05 (99.8%), 7.81E-05 (97.5%)로 기준치를 초과하는 것으로 나타났다.⁶⁵⁾ 그러나, 최일우 등(2013)이 병원근무자, 입원환자, 외래환자를 대상으로 초과 발암위해도를 조사한 결과 3.12E-06,

Table 4. Risk assessment of exposure to benzene and PM₁₀

Air pollutants	Population group	Monte-Carlo simulation									
		Fixed point mean	Percentile					Percentile			
		Mean	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%		
Benzene (excess cancer risk)	Preschool child	2.87E-05	2.88E-05	9.29E-06	1.21E-05	1.74E-05	2.50E-05	3.56E-05	4.92E-05	6.03E-05	
	Student	3.48E-05	3.48E-05	1.11E-05	1.38E-05	1.96E-05	2.87E-05	4.24E-05	6.17E-05	7.82E-05	
	Housewife	2.71E-05	2.71E-05	6.91E-06	9.41E-06	1.44E-05	2.21E-05	3.38E-05	5.00E-05	6.38E-05	
	Worker	3.27E-05	3.27E-05	7.61E-06	1.02E-05	1.54E-05	2.38E-05	3.76E-05	6.02E-05	8.34E-05	
	The old	2.65E-05	2.65E-05	8.21E-06	1.04E-05	1.49E-05	2.19E-05	3.24E-05	4.71E-05	5.97E-05	
	Housewife-lifetime	3.11E-05	3.11E-05	1.42E-05	1.63E-05	2.04E-05	2.64E-05	3.52E-05	4.83E-05	6.10E-05	
	Worker-lifetime	2.79E-05	2.79E-05	1.39E-05	1.59E-05	1.98E-05	2.54E-05	3.29E-05	4.26E-05	5.04E-05	
	Worker-lifetime	3.39E-04	3.39E-04	1.74E-04	2.01E-04	2.51E-04	3.17E-04	3.98E-04	4.91E-04	5.62E-04	
PM ₁₀ (acute disease death risk)	Preschool child	3.59E-04	3.59E-04	1.94E-04	2.19E-04	2.67E-04	3.32E-04	4.14E-04	5.11E-04	5.88E-04	
	Student	3.06E-04	3.06E-04	1.56E-04	1.79E-04	2.23E-04	2.82E-04	3.55E-04	4.42E-04	5.11E-04	
	Housewife	3.27E-04	3.27E-04	1.51E-04	1.84E-04	2.40E-04	3.08E-04	3.84E-04	4.67E-04	5.32E-04	
	Worker	3.28E-04	3.28E-04	1.69E-04	1.94E-04	2.41E-04	3.03E-04	3.80E-04	4.70E-04	5.40E-04	
	The old	3.35E-04	3.35E-04	2.21E-04	2.42E-04	2.79E-04	3.23E-04	3.72E-04	4.26E-04	4.69E-04	
	Housewife-lifetime	3.18E-04	3.18E-04	2.17E-04	2.34E-04	2.65E-04	3.04E-04	3.51E-04	4.06E-04	4.49E-04	
	Worker-lifetime	2.88E-03	2.88E-03	1.47E-03	1.70E-03	2.13E-03	2.68E-03	3.37E-03	4.16E-03	4.77E-03	
	Worker-lifetime	3.04E-03	3.04E-03	1.65E-03	1.86E-03	2.27E-03	2.82E-03	3.51E-03	4.33E-03	4.99E-03	
PM ₁₀ (chronic disease death risk)	Preschool child	2.59E-03	2.59E-03	1.32E-03	1.52E-03	1.89E-03	2.39E-03	3.01E-03	3.75E-03	4.33E-03	
	Student	2.77E-03	2.77E-03	1.28E-03	1.56E-03	2.03E-03	2.61E-03	3.25E-03	3.96E-03	4.51E-03	
	Housewife	2.78E-03	2.78E-03	1.43E-03	1.65E-03	2.04E-03	2.57E-03	3.22E-03	3.98E-03	4.58E-03	
	Worker	2.84E-03	2.84E-03	1.88E-03	2.05E-03	2.36E-03	2.73E-03	3.15E-03	3.62E-03	3.98E-03	
	The old	2.70E-03	2.70E-03	1.84E-03	1.98E-03	2.25E-03	2.58E-03	2.98E-03	3.44E-03	3.80E-03	
	Housewife-lifetime	2.70E-03	2.70E-03	1.84E-03	1.98E-03	2.25E-03	2.58E-03	2.98E-03	3.44E-03	3.80E-03	
	Worker-lifetime	2.70E-03	2.70E-03	1.84E-03	1.98E-03	2.25E-03	2.58E-03	2.98E-03	3.44E-03	3.80E-03	
	Worker-lifetime	2.70E-03	2.70E-03	1.84E-03	1.98E-03	2.25E-03	2.58E-03	2.98E-03	3.44E-03	3.80E-03	

2.18E-08 및 1.98E-08로 평가되어,⁶⁶⁾ 본 연구의 결과 보다는 발암 위해도가 낮게 평가되었다. 이것은 병원에서의 공기오염물질 관리가 적절히 이루어지고 있으며, 병원에서의 노출 시간 및 노출빈도가 병원 근무자는 연간 2,400시간(8 hr/day, 300 day/year), 입원환자는 연간 12.6시간(18 hr/day, 0.7 day/year), 외래환자는 연간 5.6시간(1 hr/day, 5.6 day/year)으로, 평생 노출을 고려한 본 연구와 다르게 병원에서의 노출만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다. 환경부(2015)에서 다중이용시설에서의 벤젠 발암위해도 조사를 한 결과 어린이집, 의료시설, 노인요양시설에서 4.2E-08, 1.3E-10, 1.4E-07로 모두 1.0E-06 이하의 수준으로 본 연구의 결과보다 낮게 평가되었다.⁴²⁾ 그러나 본 연구에서는 다중이용시설뿐만 아니라 인구집단의 노출 시나리오와 시간활동 양상을 고려하여 모든 국소환경에 대한 위해성 평가를 진행하였기 때문에, 본 연구보다 발암 위해도가 낮게 평가된 것으로 판단된다. 또한 노영만 등(2006)이 사무실에서 벤젠에 대한 건강위해성 평가를 Monte-Carlo 모의실험을 통해 진행한 결과, 남성의 발암 위해도는 평균 7.45E-07, 여성은 3.10E-06으로 나타나 본 연구보다는 낮은 값을 나타내었다. 이것은 평생동안 벤젠에 대한 노출을 고려한 본 연구와는 다르게, 하루 약 8시간 동안의 노출만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.²⁴⁾

PM₁₀ 농도 고찰 결과, 이동수단에서의 PM₁₀ 농도가 높게 나타났다. 버스, 지하철 등 이동수단은 협소한 공간이며, 이용 승객의 유출입에 의해 많은 입자상물질 유입, 이용 승객의 내부 활동, 대중교통시설의 노후 및 마모 등, PM₁₀의 실내 발생이 원인으로 판단된다. 환경부(2015)의 대중교통차량에 대한 실내공기질 실태조사 결과에 따르면, 여름철 혼잡시간대 서울지하철 4%, 인천지하철 20%가 기준치를 초과하는 것으로 측정되었다.⁴⁸⁾ 공간특성상 이동수단은 짧은시간 내 사람들에게 고농도 노출이 이루어질 수 있는 국소환경이므로 발생원에 대한 정확한 파악과 대책이 시급하다고 판단된다. 다음으로 어린이집 및 보육시설, 학교, 직장, 집 순서로 PM₁₀에 대한 위해성이 높게 나타났다. 문헌 중 이지현 등(2011)이 겨울철 쉬는 시간에 초등학교 복도에서 측정된 PM₁₀ 농도는 224.8 µg/m³ 로 기준농도를 2배 이상 초과하는 것으로 나타나 겨울철 실내 공기 환기 및

환기시설에 대한 설치 및 정비가 필요하다고 판단된다.³⁾ 집의 PM₁₀ 농도가 낮게 나타난 것은 건강영향에 대한 관심이 많아지면서 실내 환기횟수 증가와 환기시스템이나 공기청정기 사용에 의한 것으로 추측된다. 따라서, PM₁₀에 대한 건강위해성은 주요 생활공간에서 영향을 입을 가능성이 높다고 할 수 있다.

PM₁₀에 대한 위해성 평가 결과 학생, 미취학아동, 노년층, 직장인, 전업주부 순으로 나타났다. 학생은 급성노출과 만성노출시 조기 사망 위해도가 3.59E-04와 3.04E-03로 각각 약 만 명당 3.59명, 천 명당 3.04명이 조기 사망 할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 학생의 주요 활동 공간인 학교에서 머무는 시간이 7.82±2.36 hr로 높은 농도에서 노출되기 때문인 것으로 판단된다. 급성노출시 만 명당 미취학아동은 3.39명, 노년층 3.28명, 직장인은 3.27명, 전업주부 3.06명이, 만성노출시 천 명당 미취학아동은 2.88명, 노년층 2.78명, 직장인은 2.77명, 전업주부 2.60명이 조기사망 위해도에 노출될 수 있다. 특히, 민감계층인 어린이 및 노인층이 위해도가 높은 것으로 나타나 이들 인구집단에 대한 PM₁₀ 노출에 대한 특별관리가 필요하다고 판단된다. 환경부(2015)에 의하면 어린이집, 의료시설, 노인요양시설의 PM₁₀의 질병사망위해도(0.046%)는 6.9E-04, 3.0E-05, 5.3E-04로 조사되었다.⁴²⁾ 국립환경과학원(2006)이 7대광역시와 9개 도에 대한 PM₁₀에 대한 만성 사망 위해도를 조사한 결과, 95% 기준으로 만성노출과 급성노출시 7.06E-03, 8.32E-04로 조사되었다.⁶⁷⁾

각 인구집단을 연령에 따라 구분하였기 때문에 전업주부 및 직장인에 대한 전 생애 노출 평가 시 다른 부분 인구집단이 고려되지 않았다는 점과, 전업주부와 직장인의 연령이 동일하게 만 19~64세까지로 가정되었다는 점, 각 인구집단별 노출기간이 기대 수명 차이에 의한 노년층을 제외하고 동일하다는 점 등의 한계가 있었다. 그러나 학교를 졸업하고 전업주부 또는 직장인이 되기 전의 대학생 등과 같은 부분 인구집단은 시간활동이 같을 것으로 가정할 수 없기 때문에 다른 부분 인구집단을 고려하기 어려운 점, 노인복지법에서 만 65세 이상을 노인으로 규정하고 있어,⁶⁸⁾ 제도적 변화로 인해 남녀 모두 만 65세를 기점으로 시간활동 양상은 달라질 것으로 판단되는 점을 고려하였을 때, 본 연구에서의 연령과 기대수명에 따른 인구집단 분류는 타당하다고 생각한다.

벤젠과 PM₁₀ 농도에 대한 우리나라의 실측 데이터를 이용하여 노출평가를 실시하기 위해 우리나라에서 지난 10년간 발표된 연구 결과에 대한 메타분석을 통해 각 국소환경에서의 농도를 조사하였다. 또한 통계청의 생활시간조사 자료를 기반으로 한 시간 활동 양상 연구 결과를 이용하여 하루 중 TWA 노출 농도를 산출하였다. 따라서 본 연구에서 조사된 인구집단별 노출 농도는 각 우리나라 인구집단에 대한 대표성이 있다고 할 수 있다.

노출은 국소환경에서의 노출 농도와 노출 시간의 함수로 나타낼 수 있다(exposure=concentration×time). 노출 농도뿐만 아니라 노출 시간도 노출을 결정짓는 요소이기 때문에 공기오염물질에 대한 노출 평가 시에는 시간활동 양상 등을 통한 노출 시간 공기오염물질에 대한 노출을 낮추기 위해서는 농도가 높은 국소환경뿐만 아니라 노출 시간이 많은 국소환경을 관리할 필요가 있다.

일반적인 위해성 평가는 실측 자료를 바탕으로 얻어진 하나의 평균값, 즉 단일 값으로 평가되는데, 이러한 평가는 평생 동안 평균 농도로 동일하게 노출된다고 가정된다는 한계가 있다.⁹⁾ 그러나 본 연구에서는 확률 분포를 이용하여 Monte-Carlo 모의실험을 통해 위해성평가를 실시하여 각 인구집단의 노출 분포에 근거한 확률론적 위해성을 평가하였다는 의의가 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 기존 연구에 대한 문헌고찰을 통하여 미취학 아동, 학생, 전업주부, 직장인, 노년층의 부분 인구집단과, 연령을 기준으로 한 전업주부 및 직장인 생애에 대한 위해성 평가를 진행하였다. 각 국소환경에서의 농도 분석 결과, 벤젠은 기타 실내에서의 농도가 가장 높게 나타났으며, PM₁₀은 이동수단에서의 농도가 가장 높게 나타났다. 또한 부분 인구집단에 따라 위해성에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 벤젠에 대한 초과발암 위해도가 모두 1.0E-06 이상으로 높게 평가되어 관리가 필요할 것으로 판단되었다. PM₁₀에 대한 위해도 역시 질병 조기 사망 위해도가 만 명당 1명 이상으로 높게 평가되어 PM₁₀ 노출에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 시간활동 양상에 따른 각 국소환경에서의

노출 및 위해성 평가를 실시하여, 공기오염물질에 대한 전 생애 통합 노출 및 위해성평가를 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활공간환경보건기술사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001350001).

References

1. Ministry of Environment. Atmosphere Environmental Standard. 2019.
2. Ministry of Health and Welfare. Evaluation on the Indoor Air Quality at Academy and Health Effect Investigation. 2009
3. Lee C, Lee B, Kim Y, Lee J, Oh I. Analysis of Indoor Air Pollutants from Elementary School Classrooms with Different Environment in Ulsan, Korea. *Korean Society for Atmospheric Environment*. 2011; 27(1): 97-116.
4. Oh D, Lee S, Lee B, Kim Y. A study on the Identification of Sources for Benzene Detected in the Casting Process. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2006; 16(1): 27-35
5. ATSDR: Toxicological profile for Benzene, 2007. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3.pdf> [accessed 22 April 2019]
6. Ministry of Environment. Indoor fine dust management manual. 2014
7. Thurston GD, Kipen H, Annesi-Maesano I, Balmes J, Brook RD, Cromar K et al., What Constitutes an Adverse Health Effect of Air Pollution?, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2000; 161(2): 665-673
8. Yang W, Lee K, Park K, Yoon C, Son B, Jeon J, et al., Microenvironmental time activity patterns of weekday and weekend on Korean. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2009; 6(4): 267-274
9. Lim Y. Health risk assessment of indoor pollutants. *Journal of Korean Environmental Engineers*. 2007; 29(5): 502-511
10. World Health Organization. Integrated Risk Assessment. https://www.who.int/ipcs/methods/risk_assessment/en/. [accessed 22 April 2019]
11. Lee H, Lee S, Lee B, Heo J, Kim S, Yang W. Esti-

- mation of personal exposure to air pollutants for housewives using time activity pattern and evaluating air quality of micro-environments, *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2014; 13(3): 159-167.
12. Park J, Ryu H, Yang S, Park Y, Heo J, Kim E et al. Exposure and risk assessment of nitrogen dioxide and ozone sub-population group using Monte-Carlo simulation. *Korean Journal of Environmental Health Sciences*. 2019; 45(2): 1-13.
 13. Baek S, Jeon C. Distributional Characteristics of Volatile Organic Compounds in the Indoor Air of Various Office Environments. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2014; 30(5): 477-491
 14. Jang S, Chun J, Kim S, Park S, Ryu J, Lim J, et al. Seasonal variations of volatile organic compounds (VOCs) in indoor air of daycare centers. *Analytical Science & Technology*. 2007; 20(6): 474-482
 15. Jeon J, Jeong M, Lee H, Kang B. Characteristics of Indoor Hazardous Pollutants in Classroom of Schools. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2010; 7(1): 47-61
 16. Jung J, Lee S, Phee Y. The Assessment of Volatile Organic Compounds at Schools in the Ulsan Metropolitan Area. *Journal of the Korean Society of School Health*. 2012; 25(1): 114-121
 17. Korea Railroad Corporation. Railway statistics annual report (II). 2017
 18. Lee C, Kim Y, Song M, Sim I, Sim S. Distribution of Concentration on Volatile Organic Compounds in Hospital. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2008; 5(4): 273-289
 19. Lee J, Kim K, Ryu S, Kim C, Bae G. the relative Importance of Indoor and Outdoor sources for Determining Indoor Pollution concentrations in Homes in seoul, south Korea. *Journal of Atmospheric Environment*. 2018; 12(2): 127-138
 20. Kim Y. Indoor Air Quality and Exposure Assessment of VOCs in School, [dissertation]. [Seoul]: Hanyang University; 2008
 21. Lim Y, Lee C, Kim H, Yang J, Lee G, Shon J, et al. A Study on the Indoor Air Pollution in the Classrooms of Elementary Schools in Korea - Focused on VOCs, Formaldehyde, PM₁₀ and Indoor Allergens in Dust. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2008; 5(1): 37-49
 22. Ministry of Environment. Investigation and management method of indoor air quality of public transportation such as subway. 2006.
 23. Roh Y, Kim J, Lee C, Kim Y, Ha M, Kwon H, et al. A Survey of Distribution for Indoor Air Pollutants in Classrooms of Some Elementary Schools, *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2007; 4(4): 204-213.
 24. Roh Y, Lee C, Kim Y, Kim S, Kim C, Kim H, et al. Extension Possibility of Indoor Air Standards in Office Building by Health Risk Assessment. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2006; 16(1)
 25. Shin H, Jeon J, Kim Y. Characteristics of Volatile Organic Compounds for Indoor Air in Child-care Facilities. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2011; 8(2): 105-116
 26. Roh Y, Lee C, Kim Y, Kim S, Kim C, Kim H, et al. Extension Possibility of Indoor Air Standards in Office Building by Health Risk Assessment. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*.
 27. Son B, Lee J, Park J. Health Risk Assessment Based on Concentration of BTX among Volatile Organic Compounds in School. Proceeding of the 41st meeting of KOSAE Korean Society for Atmospheric Environment. 2006
 28. Won S, Kwon M, Ji H, Shin I. A study on the distribution characteristics of indoor VOCs concentration in apartments. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2016; 15(3): 268-276
 29. Woo B, Lee H, Ahn H, Jung S, Hwang M, Park C et al. Perceived Air Quality Assessment of Occupants According to Indoor Air Quality. *Journal of Environmental Science International*. 2011; 20(1): 61-69.
 30. Yang J, Kim H, Shin D, Kim Y, Sohn J, Lim J, et al. Health Risk Assessment of Occupants in the Small-Scale Public Facilities for Aldehydes and VOCs. *Journal of the Environmental Sciences*. 2008; 17(1): 45-56.
 31. Yang W, Kim D, Hong G, Kim S, Ahn H. Contribution of Workplace and House Indoors for Personal Nitrogen Dioxide Exposure in Office Workers According to Season, *Journal Korean Society of Occupational and environmental hygiene*. 2012; 22(2): 128-133.
 32. Lee H, Lee S, Lee B, Heo J, Kim S, Yang W. Estimation of Personal Exposure to Air Pollutants for Workers Using Time Activity Pattern and Air Concentration of Microenvironments. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2014; 24(4): 436-445.
 33. Im J. Characteristics of Indoor and Outdoor Air Quality in the elementary School, Ulsan, [disserta-

- tion]. [Ulsan]: University of Ulsan; 2011.
34. Park S. Characteristics of Indoor Air Quality in the Public Facilities, Ulsan, [dissertation]. [Ulsan]: University of Ulsan; 2011.
 35. Ryu I. A study Characteristic on Indoor Air Quality and Health Risk Assessment in Multi-use Facilities, [dissertation]. [Busan]: Pukyong National University; 2010.
 36. Choi I. A Study of Indoor Air Quality in Various Types of Public Facilities in Seoul, [dissertation]. [Seoul]: University of Seoul; 2011.
 37. Hong S, Jou H, Cho T, Lee C, Jung Y, Son B. A study of Indoor Air Quality of Public Facilities in Chung-Nam Area. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*. 2008; 23(2): 35-45.
 38. Jung J, Seo B, Ju D, Park M, Son B, Phee Y. Assessment of the Indoor Air Quality at Schools in Ulsan. *Korean Journal of Environmental Health Sciences*. 2010; 36(6): 472-479.
 39. National Institute of Environmental Research. Environmental tobacco smoke survey on multi-use facility and indoor air quality of vulnerable group residential space. 2012.
 40. Lee D, Lee S, Bae S, Kim N, Park K, Kim D, et al. The Concentration of Indoor Air Quality and Correlations of Materials at Multiple-use Facilities in Gwangju. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2010; 32(11): 1001-1010.
 41. Lee K, Kim J, Bae S, Kim S. Research Study on Indoor Air Quality (IAQ) inside of the Subway Cabin in Seoul Metropolitan City. *Korean Society for Atmospheric Environment*. 2014; 30(2): 175-187.
 42. Ministry of Environment. Survey on the Actual Condition of Indoor Air Quality in Non-Prosecuted Multi-use Facilities. 2015.
 43. Occupational Safety and Health Research Institute. Guideline development for evaluation and management of office air quality (I). 2004.
 44. Park J. Indoor Air Quality in daycare facilities. *Community Education Facilities*. 2014; 21(6): 28-32.
 45. Shin H, Park W, Kim B, Ji K, Kim K. Indoor Air Quality and Human Health Risk Assessment for Un-regulated Small-sized Sensitive Population Facilities. *Korean Journal of Environmental Health*. 2018; 44(4): 397-407.
 46. Jeong G, Chon T. Study of Indoor Air Quality from the Several Offices in Busan Area. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*. 2006; 9(1): 7-12.
 47. Kim D, Park M, Lee S, Kim H, Lee W, Cha J. The Influence of Office Indoor Air Quality on the Dry Eye Symptom of Contact Lens Wearers. *Journal of Korean Ophthalmic Optics Society*. 2012; 17(2): 215-222.
 48. Korea Railroad Research Institute. Study on Indoor Air Quality Criteria of Public Transportation and Improvement of Measurement Method. 2014.
 49. Kim M, Lee J, Kim S. A study on the Measurement and Analysis of Indoor Air Quality in Busan Subway Station. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. 2018; 2018(6): 827-830.
 50. Korea Environment Corporation, 2010, Survey on the Actual Condition and management solution of children indoor activity place. webbook.me.go.kr/DLi-File/pdf/2012/02/5507960.pdf [accessed 22 April 2019]
 51. National Institute of Environmental Research. A study on management of major air pollutants by house type in Korea (II). 2010.
 52. Lee C, Lee B, Kim Y, Lee J, Oh I, Sim C. Indoor Air Quality in Elementary School Children's Homes in Ulsan: Comparison between Groups with and without Allergic Rhinitis. *Korean Society for Atmospheric Environment*. 2012; 28(4): 365-373.
 53. Ministry of Environment. A study on the Pollution of Hazardous Substances in Children's Facilities for the Risk assessment and Management. http://www.prism.go.kr/homepage/researchCommon/downloadResearchAttachFile.do?work_key=001&file_type=USR&seq_no=001&pdf_conv_yn=N&research_id=1480000-200700036. 2008
 54. Ministry of Environment. A study on the Management of Fine dust in Multi-use Facilities. http://m.konetic.or.kr/include/EUN_download.asp?str=TBL_ENV_THEMA&str2=7101. 2015
 55. Seong N, Hong Y, Yoon D. The Investigation of Indoor Air Contamination Levels in Daycare Facilities Focused on Uncontrolled in the capital area. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*. 2012; 19(3): 305-316.
 56. Ryu H, Yoon H, Eom I, Park J, Kim S, Cho M, et al. Time-activity Pattern Assessment for Korean Students, *Journal of Environmental Health Society*. 2018; 44(2): 143-152.
 57. National Institute of Environmental Research. Korean exposure factors handbook for children Child-specific exposure factors handbook. Environmental Health Research Department, Risk Assessment Division. 2016.

58. Lee H, Woo B, Hwang M, Park C, Yu S, Yang W. Assessment of Time Activity Pattern for Workers, *Journal Korean Society of Occupational and environmental hygiene*. 2010; 20(2): 102-110.
59. National Institute of Environmental Reseach. Study on the Improvement of Exposure Factors of Korean Adults on Risk Assessment (II). 2017.
60. Moschandreas DJ, Watson J, D'Abreton P, Scire J, Zhu T, Klein W, et al. Chapter three: methodology of exposure modeling. *Chemosphere* 2002; 49(9): 923-946
61. European Commission. Externalities of Energy. Methodology 2005 update. 2005.
62. United States Environmental Protection Agency. National Center for Environmental Assessment. Integrated Risk Information System (IRIS) Chemical Assessment Summary. Benzene; CASRN 71-43-2. 2003
63. Ministry of Environment. Risk assessment of indoor hazardous factors for the susceptible population and management technique development. 2016.
64. National Institute of Environmental Research. Study on the Improvement of Exposure Factors of Korean Adults on Risk Assessment (III). 2018
65. National Institute of Environmental Research. Study on media-integrated risk assessment of life sympathy hazardous substances (I): benzene. 2011.
66. Choi I, Lee J, Kim D, Ryu H, Kim T, Lee S, Lee J, Choi Y, Kim H. A Study Characteristic on Indoor Air Quality and Health Risk Assessment in Medical Facility. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2013; 10(2): 115-128.
67. National Institute of Environmental Research. Study on the development of comprehensive evaluation method of air pollution. 2006.
68. Ministry of Health and Welfare. Welfare of the Aged Act. 2019.

<저자정보>

박진현(대학원생), 양소영(교수), 박윤경(대학원생), 류현수(연구원), 김은채(대학원생), 최영태(대학원생), 허정(대학원생), 조만수(교수), 양원호(교수)