

노출평가 방법론에 대한 과거와 현재, 그리고 미래

곽수영¹ , 이기영^{1,2*}

¹서울대학교 보건환경연구소, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Review of Exposure Assessment Methodology for Future Directions

Sooyoung Guak¹ and Kiyoung Lee^{1,2*}

¹Institute of Health and Environment, Seoul National University, ²Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

Public interest has been increasing the focus on the management of exposure to pollutants and the related health effects. This study reviewed exposure assessment methodologies and addressed future directions. Exposure can be assessed by direct (exposure monitoring) or indirect approaches (exposure modelling). Exposure modelling is a cost-effective tool to assess exposure among individuals, but direct personal monitoring provides more accurate exposure data. There are several population exposure models: stochastic human exposure and dose simulation (SHEDS), air pollutants exposure (APEX), and air pollution exposure distributions within adult urban population in Europe (EXPOLIS). A South Korean population exposure model is needed since the resolution of ambient concentrations and time-activity patterns are country specific. Population exposure models could be useful to find the association between exposure to pollutants and adverse health effects in epidemiologic studies. With the advancement of sensor technology and the internet of things (IoT), exposure assessment could be applied in a real-time surveillance system. In the future, environmental health services will be useful to protect and promote human health from exposure to pollutants.

Key words: Exposure assessment, exposure modelling, personal exposure, time-activity pattern

Received April 12, 2022

Revised April 24, 2022

Accepted May 2, 2022

Highlights:

- Exposure assessment could be conducted by direct or indirect methodologies.
- Recent technology development could be applied to new exposure assessment method.
- Environmental health service will be useful to provide active management of human health from exposure.

*Corresponding author:

Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
 Tel: +82-2-880-2735
 Fax: +82-2-762-2888
 E-mail: cleanair@snu.ac.kr

I. 서 론

과거의 노출평가(exposure assessment)는 특정 노출원과 주요 노출경로(exposure pathway)를 통한 환경매체(예. 대기, 수질, 토양 등) 중심의 연구가 진행되었지만, 개인의 노출량을 측정할 수 있는 장비와 기술이 발전함에 따라 수용체 중심의 노출평가

(receptor-based exposure assessment)로 환경보건 정책의 패러다임이 전환되고 있다. 우리나라에서 환경성 질량의 증가로 인해 “환경보건종합계획(2011~2020)”을 통해 각 수용체 중심 노출평가의 중요성과 필요성을 강조하고 있으며, 단순한 사후평가 중심이 아닌 수용체의 노출과 건강영향을 최소화할 수 있는 사전예방주의적 노출평가 기술개발과 환경보건 국가 정책의 방

향으로 추진되고 있다.

하지만 아직도 많은 연구가 환경매체에서의 오염물질 농도를 대상으로 이루어지고 있으며 사람이 직접 오염물질에 어디서, 얼마나, 어떤 경로로 노출되는지를 알 수 있는 개인노출 평가에 대한 연구는 그 비용과 시간이 많이 드는 실현가능성의 한계점으로 인해 상대적으로 수행되기 쉽지 않다. 노출평가 연구는 필연적이며 근본적으로 오염물질의 노출로 인한 건강영향의 결과를 사전에 감축하며 회피할 수 있도록 해야 한다. 본 논문에서는 국내외적으로 강조되고 있는 수용체 중심의 노출평가의 필요성과 그 방법론의 발전사를 소개하여 고찰하고, 향후 10년간의 노출평가가 나아가야 할 미래의 방향과 비전에 대해 제시하고자 한다.

II. 노출평가 방법론

환경오염물질에 대한 노출은 오염물질이 사람의 입, 피부, 코 등과 같은 외부 경계와 접촉하는 것으로 정의되며, 사람이 머무른 장소에서의 오염물질 농도와 노출된 시간에 의해 결정된다. 노출경로는 오염원으로부터 오염물질이 수용체에 도달하는 물리적 경로를 말하며 대표적으로 흡입(inhalation), 섭취(ingestion), 피부 접촉(dermal contact) 3가지 경로가 있다.

노출평가는 환경오염물질 접촉의 양적 또는 질적 평가로, 오염물질 발생원에서 수용체가 실제로 노출되는 정도를 정량적 또는 정성적으로 산출하여 노출 수준을 추정하고 평가하는 중요한 분석적 도구로써, 역학연구와 건강위해성평가 연구에서 필수적이다. 노출평가를 수행하기 위해서는 다양한 변수가 필요하며 그 변수에는 오염물질의 농도, 노출기간, 노출경로, 노출빈도 등이 있다. 노출평가 핵심 요소의 관계도를 Fig. 1에 나타냈다.¹⁾ 오염물질의 발생원(source)으로부터 오염물질(stressor)과 수용체와의 접촉(contact)을 통해 노출이 발생하고 이로 인해 발생하는 매체의 오염이나 수용체의 건강영향(outcome)은

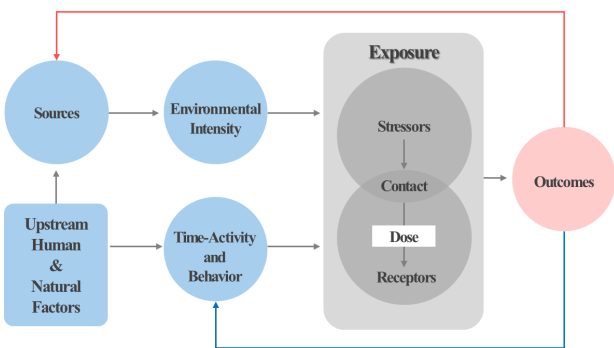


Fig. 1. Core elements of exposure assessment as related to human and ecosystems

*This picture was revised from original diagram.¹⁾

다시 회귀되어 유기적 연계를 가증시킬 수 있다. 따라서 노출에 실질적으로 기여하는 노출요인과 경로를 파악하여 수용체의 오염물질 노출 수준과 상관성을 분석하고 노출평가를 실시할 필요가 있다.

노출평가는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 수행될 수 있다. 직접적인 노출평가는 개인노출 모니터링(personal monitoring)과 생물학적 모니터링(biological monitoring) 방법을 통해 실제 오염물질에 노출되는 양을 평가할 수 있으나, 많은 연구대상자를 확보하기 어렵고 비용과 시간이 많이 드는 등 그 실현가능성 때문에 한계점을 가지고 있다.²⁾ 간접적인 노출평가는 직접적 노출평가보다 비교적 적은 비용으로 노출 정보를 제공할 수 있으나 생물학적 모니터링에서 가능한 오염물질의 내적 노출량 산출이 어렵다. 이렇듯 노출평가에서는 보다 정확하지만 비용과 시간이 많이 드는 직접적인 방법이 간접적인 방법보다 우선시되고 있으나 두 방법의 장단점을 활용하여 함께 사용하면 보다 상호보완적으로 정확한 결과를 산출할 수 있다.

1. 직접적 노출평가

직접적 노출평가는 개인의 환경오염물질에 노출되는 양을 직접 측정하는 개인노출 모니터링 방법과 오염물질과 목적기관의 반응물 또는 대사체인 생체지표(biomarker)를 이용하는 생물학적 모니터링 방법이 있다. 개인노출 모니터링 방법은 사람의 신체 중 노출 부위에 측정기기를 부착하여 노출된 시간 동안의 오염물질 노출농도인 외적 용량(external dose)을 측정하고 이를 분석하여 외적 노출량을 알아보는 방법이다. 대표적인 예로 미세먼지의 개인노출 모니터링 방법은 호흡기 영역(breathing zone)에 측정기를 착용하여 용량을 쉽게 파악할 수 있지만 다른 노출 경로인 섭취나 피부 접촉에 의한 흡수는 반영하지 못한다는 한계점이 있다. 생물학적 모니터링은 사람의 생체지표인 혈액, 소변, 변, 혈액, 머리카락 등에서 오염물질의 내적 용량(internal dose)을 측정하여 내적 노출량을 평가하는 방법으로, 오염물질의 반감기를 고려하여 생체지표를 선정하여야 하며 시료를 수집하는 방법, 수집시기, 분석방법, 수용체 내의 오염물질 노출량 측정에 영향을 미치는 요인들에 대한 이해가 선행되어야 한다. 또한, 모든 노출경로에서의 통합적 노출을 제공하지만 노출평가 관리에 필요한 노출경로를 직접 파악할 수 없으며 위해도가 여러 오염물질과 관련하여 복잡하게 존재하는 경우에는 단면의 문제만을 부각시켜 정확한 노출평가가 어렵다.

국내외에서 오염물질의 인체 노출에 대한 국가단위의 노출평가 사업이 여러 형태로 진행되고 있다. 국립환경과학원에서는 2008년 환경보건법 제정 이후, 2009년부터 환경보건법 제4조에 근거하여 3년 주기로 국가승인통계(106027호) “국민환경보건 기초조사”를 실시한다. 국민환경보건 기초조사는 국민의 환경유해물질 농도 수준과 영향요인을 파악 및 분석하는 법정 업무로 거주환경, 실내·외 환경과 생활습관 요인 파악을 위한 설

문조사와 대상자의 생체시료 내 납, 수은, 비스페놀-A 등 중금속이나 환경호르몬 같은 주요 환경유해물질의 신체 내 수준을 파악한다. 또한 지역적 유해물질 농도 분포, 노출경로, 노출원 등을 평가하여 한국형 국가 인체 노출평가 체계를 구축하여 국민 건강증진 정책 개발에 필요한 과학적 근거를 제시하고 있다. 현재 제4기 기초조사(2018~2020년) 결과가 2021년 12월에 발표되었으며 제5기 기초조사(2021~2023년)가 진행중으로 2024년 12월에 그 결과를 공표할 예정이다.

미국에서의 대표적인 인체노출 평가 사업은 미국 질병관리본부(Center for Disease Control and Prevention, CDC)에서 1960년대부터 시행한 국민건강영양조사(National Human and Nutrition Examination Survey, NHANES)와 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 1995년부터 주도한 환경오염물질에 대한 인체노출 평가를 위한 국가인체노출평가(National Human Exposure Assessment Survey, NHEXAS) 사업이 있다. NHANES는 국민의 영양 및 건강상태 평가를 위해 미국인의 중금속류, 내분비장애물질, 농약류 등의 인체 노출수준을 성별, 연령별, 인종별로 제시하여 대표성 있는 자료를 산출하고 있다. NHEXAS는 소변과 혈액 내의 오염물질 노출수준, 노출원 확인을 위한 설문조사를 통해 하루 음식 섭취량, 생활행태를 파악하며 각 매체에서의 오염물질 샘플링을 통해 노출평가를 시행하였다. 독일의 경우, 환경 분야 생체모니터링 프로그램(German Environmental Survey, GerES)을 1980년대부터 3~5년 주기로 실시하여 각 매체 내 오염물질 분포와 생체시료를 통한 바이오 모니터링 정보를 문서화하고 노출평가 모델을 수립하였다.

2. 간접적 노출평가

간접적 노출평가는 환경 매체에서의 오염물질의 농도를 분석하고 수용체가 접촉하여 오염물질을 흡수할 수 있는 노출 시나리오를 가정하여 외적 노출량을 추정한다. 그 방법에는 환경 모니터링(environmental monitoring), 노출 모델링(exposure modelling), 설문지(questionnaires)와 일지(diaries)를 활용한 개인의 시간활동양상(time-activity pattern)과 노출 요인을 조사하는 것이 있다.

환경 모니터링은 환경 매체에 포함되어 있는 오염물질의 농도를 측정하여 평가하는 방법으로 전문적인 측정 지식과 고가의 측정 장비가 필요하기 때문에 상대적으로 적은 수의 모니터링이 일반적이다. 미국 캘리포니아 주에서는 272개의 대기오염 측정망이 있으며 캘리포니아 주 면적 100 km² 당 약 6개꼴로 운영되고 있다.³⁾ 한편, 우리나라는 2022년 현재 510개의 대기오염측정망이 있으며 이는 전국 면적 100 km² 당 약 23개꼴로 캘리포니아 주보다 약 4배 높은 측정소 밀도를 가지고 있다.⁴⁾ 그러나 이렇게 상대적으로 고밀도의 촘촘한 측정소의 운영에도 불구하고 개인 단위에서 정보를 생산, 분석, 가공하기에는

큰 어려움이 따른다. 또한, 인구집단 노출의 대표성을 갖기 힘들기 때문에 노출평가에 활용 가능한 개인의 직접적인 위해정보를 제공하기 힘들다.

이전의 많은 역학 연구에서 오염물질의 개인노출은 고정된 국가대기측정망에서 측정된 실외 농도만으로 평가하였으나 그 정확도에 대한 의문이 지속적으로 제기되어 왔다.⁵⁾ 하지만 사람들이 하루 24시간 중 실내에서 머무르는 시간은 80% 이상이기 때문에 실내 및 실외 환경을 모두 고려한 농도를 통해 평가해야 한다.^{6,7)} 한편, 오염물질에 대한 노출평가에서는 국소환경(microenvironment)의 농도 측정과 함께 사람이 오염물질과 언제, 어디서, 어떤 활동을 통해 오염물질과 접촉하는지 알 수 있는 시간활동양상의 파악도 중요한 요인이다. 시간활동양상에는 노출이 이루어지는 장소, 장소에서 일어날 수 있는 활동을 비롯하여 그 활동과 장소에서 소요되는 시간에 대한 정보 등이 포함되며 이 정보들은 성별, 연령 등 사회, 인구학적 요소에 따라 달라지기 때문에 다양한 인구학적 특성에 따른 차이도 고려되어야 한다.

우리나라에서는 1999년부터 5년 주기로 통계청의 생활시간조사(Korea Time Use Survey)가 시행되고 있다. 생활시간조사는 전 국민을 대상으로 대표성 있는 표본 대상자를 추출하여 사회, 경제, 인구학적 문항이 담긴 설문조사와 매 10분 간격으로 하루동안 이동하고 한 행동에 대해 자기기입식으로 기록하게 하였으며 현재 2019년까지 조사가 시행되고 결과가 공표되었다(Table 1). 매 5년마다 국민들이 하루 24시간을 어떻게 사용하는지에 대한 시간활용 방식의 변화를 파악하고 일과 생활의 균형, 복지, 문화, 교통, 가사노동의 가치평가 등 관련 정책수립의 기초자료와 학문연구 자료로 활용된다. 국내 선행 연구들에서 통계청 생활시간조사 자료를 환경보건학적 접근으로 활용하여 우리나라 국민의 시간활동양상을 분석하고 하루 중 각 장소에서 보낸 시간을 파악하였다.⁸⁻¹²⁾ 후속 연구로 분석된 시간활동양상 자료를 활용하여 노출군 특징별로 노출 시나리오를 가정하고 개인노출 측정을 통해 오염물질의 평균 노출량을 파

Table 1. Information of Korea time use survey

Year	Time use survey (month)	Sample size (N)
1999	1st (September)	17,000 households (about 46,000 persons)
2004	2nd (September)	12,750 households (about 32,000 persons)
2009	3rd (March, September)	8,100 households (about 21,000 persons)
2014	4th (July, September, December)	12,000 households (about 27,000 persons)
2019	5th (July, September, December)	12,435 households (about 29,000 persons)

악하였다.^{13,14)}

노출모델(exposure model)은 다양한 입력자료로부터 개별 혹은 집단 노출량을 추정하기 위한 방법으로 기존의 데이터가 없거나 실측이 불가능한 상황에서 노출평가에 활용할 수 있는 간접적 노출평가 방법이다. 사람의 활동공간에서 오염물질 농도 값과 머무는 시간을 시간가중평균 모델에 적용하여 간접적인 개인 노출량을 추정하는 것이 일반적으로 활용되고 있다.

$$E = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n C_i t_i$$

E =오염물질의 노출 평균농도

T =노출되는 시간의 총합

C_i = i 장소에서의 오염물질 노출 농도

t_i = i 장소에서 노출 시간

국내외에서는 시간활동양상을 활용한 인구집단의 노출을 평가하는 노출모델을 개발하여 오염물질의 노출량을 추정하였다(Table 2). 통계청의 2014년 생활시간조사 중 서울시민에 대한 시간활동양상을 분석하고, 각 국소환경(집, 학교/직장, 기차장소, 식당, 교통수단)에서 실측한 $PM_{2.5}$ 농도와 동시간대 서울시 25개구 도시대기측정망의 $PM_{2.5}$ 농도를 이용하여 노출평가 모델 Korea simulation exposure model (KoSEM)을 개발하여 계절별 인구집단의 $PM_{2.5}$ 노출 분포를 도출하였다.¹⁵⁾ 미국 EPA에서는 미국 인구 시간활동양상 자료 Consolidated human activity data (CHAD)를 활용하여 Stochastic human exposure and dose simulation (SHEDS)⁵⁾와 Air pollutants exposure (APEX)^{16,17)} 모델을 개발하였고 미국 인구집단의 노출평가에 활용하고 있다. SHEDS 모델은 미세먼지에 의한 인구집단 노출을 파악할 수 있는 확률적 인체노출량 시뮬레이션 모델로, 미국 필라델피아의 2010년 인구센서스 자료를 바탕으로 시간활동양상 및 국소환경을 파악하였으며, 이 지역에서의 대기 중 미세먼지 농도 자료와 국소환경별 자료(미세입자 농도, 행동에 따

른 미세입자 발생률 등)를 활용하여 노출을 추정하고 호흡량을 고려하여 노출량을 추정하였다. APEX 모델은 인구집단 기반, 확률론적 흡입노출모델로 흡입노출량 산정에 사용할 수 있다. 이 모델은 확률적으로 모집단 데이터베이스에서 가상의 개인의 대규모 표본을 생성하고 시간과 공간을 통한 개인의 이동을 시뮬레이션하여 실내·외에서 발생하는 공기오염물질의 시간별 노출량을 추정할 수 있다.

유럽에서는 Air pollution exposure distributions within adult urban population in Europe (EXPOLIS)^{18,19)} 모델을 개발하여 6개 유럽 국가의 6개 도시(그리스 아테네, 스위스 바젤, 프랑스 그르노블, 핀란드 헬싱키, 이탈리아 밀라노, 체코 프라하)의 성인인구의 노출량을 추정하였다. 인구집단의 노출분포, 주요 국소환경의 농도 분포, 대상 인구집단의 시간활동 분포를 직접 구할 수 있으며 EXPOLIS 데이터를 이용해 다양한 대기 오염원의 노출 기여도, 대기오염 노출에 대한 각종 요인의 관계를 분석하였다. 또한 선택된 하위 인구집단, 선택된 도시 지역, 선택된 미래 시나리오의 인구 노출 분포를 추정할 수 있다. 프랑스 Exposure to atmospheric pollution modelling (EXPLUME)²⁰⁾은 O_3 와 $PM_{2.5}$ 에 대한 개인노출을 평가하기 위한 지역 규모 모델로 2017년 한 해 동안 일드프랑스(Île-de-France) 지역에 2 km×2 km 분해능에서 노출량을 시뮬레이션 하였으며 모델의 입력변수로는 Enquête Globale de Transport (EGT) 데이터, 실외농도, 실내/실외 비율(indoor-to-outdoor concentration ratio, I/O ratio), 센서스 데이터, 모빌리티 데이터, 지오메트리 모델을 사용하여 추후 건강영향평가에서도 활용할 수 있다.

III. 미래 노출평가 연구의 방향

개인의 노출을 직·간접적으로 평가하기 위한 방법 연구는 시대에 따른 기술 발전과 함께 더불어 발전하고 있다. 산업화 시대의 기술이 발전함에 따라 개인 노출량을 측정하기 위한 전문 측정기기의 소형화 및 저가형 센서 기술의 개발로 연구적 접근

Table 2. Summary of population exposure models in previous studies

Reference	Model	Pollutant	Location	Inputs
Guak et al., 2021 ¹⁵⁾	KoSEM	$PM_{2.5}$	Seoul, Korea	Outdoor conc., Korea time use survey, I/O ratio
Burke et al., 2001 ⁵⁾	SHEDS-PM model	$PM_{2.5}$	Philadelphia, PA, USA	CHAD, 2010 census, Outdoor conc., mass balance modelled data
Langstaff et al., 2017 ¹⁶⁾ ; Johnson et al., 2018 ¹⁷⁾	APEX model	PM, O_3 , CO	12 metropolitan area, USA	CHAD, 2010 census, Outdoor conc., physiological attributes, meteorological data
Kruize et al., 2003 ¹⁸⁾ ; Hänninen et al., 2003 ¹⁹⁾	EXPOLIS simulation model	$PM_{2.5}$, PM_{10}	Athens, Basel, Grenoble, Milano, Helsinki, Prague	EXPOLIS data, spatial location of the population, time-location data, PM conc.
Valari et al., 2020 ²⁰⁾	EXPLUME	$PM_{2.5}$, O_3	Paris, France	EGT data, I/O ratio, outdoor conc., geometry model, mobility data

가능성이 용이해지고 값비싼 표준측정방법의 기기보다 실시간 단위의 많은 표본수를 얻을 수 있다. 하지만 센서를 활용한 노출평가 연구에 앞서 센서의 측정결과에 대한 신뢰도가 낮아 표준측정방법과의 비교를 통한 검증(validation)이 선행되어야 한다. 국내 선행 연구에서 센서를 평가하여 보정하고 미세먼지 농도를 측정하여 실내공기질을 평가한 바 있다.^{21,22)} 우리나라 환경부에서는 2019년 8월부터 “미세먼지 간이측정기 성능인증제”를 시행하여 센서의 오염물질 측정결과를 평가하고 그 신뢰수준을 등급으로 구분하였고 소비자들에게 그 정보를 공개하여 제공하고 있다. 이는 센서의 제조사 또는 공급자가 더 높은 인증 등급을 받기 위한 기술개발 등의 효과를 유도하여 보다 더 다양하고 신뢰성 높은 연구들의 활성화를 기대할 수 있을 것이다. 한편, 측정기기는 이전에 비해 소형화가 되고 있으나 아직 극초소형화의 단계에 이르지 못하고 있다. 미래의 측정기기는 극초소형으로 될 가능성이 높다. 극초소형의 정확한 정의는 없지만 측정기기가 1센티미터나 1밀리미터의 크기가 된다면 측정의 일상화가 가능하여 보다 더 많은 측정 데이터를 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

우리나라는 다른 나라에 비해 상대적으로 많은 수의 대기오염측정망을 구축하여 실시간 빅데이터(big-data)를 생산해내고 있지만 효율적인 통합 데이터베이스(database, DB) 마련이 미비하고 여러 경제적, 시간적인 이유로 표준측정법을 차용하는 환경모니터링의 고밀도화는 더 이상 급격하게 이루어지기에는 한계가 있다. 따라서 이에 대한 대안으로 사물인터넷(internet of things, IoT) 기반 센서를 활용하여 시간적, 공간적 정보의 고도화를 통해 간접적으로 노출평가를 효율적으로 시행할 수 있다. IoT란 사물, 공간 등이 인터넷으로 연결되어 정보가 수집, 생성되고 활용되는 체계를 나타내며 짧은 시간에 광범위한 빅데이터 생성이 가능하다. 사물에서 생산되는 빅데이터는 데이터 사이언스의 발전으로 통계 기법이나 인공지능 기법인 머신러닝(machine learning), 딥러닝(deep learning) 기술 등을 이용한 분석을 통해 다양한 지식과 노하우를 얻을 수 있으며 과거는 물론 미래까지 예측하는 노출 정보의 제공이 가능할 수 있다. 이런 일상적인 노출정보는 의료체계와 연결이 가능하며 주변 생활환경의 관리와 연계가 가능할 것이다.

기존의 개인노출 평가 연구에서는 설문지를 통한 응답을 토대로 시간활동양상 파악하여 노출평가가 이루어졌으나 수기로 작성하여 실측값과의 오류가 발생하는 등의 문제점이 있었다. 2000년대부터는 Global positioning system (GPS) 발달로 GPS 장치를 노출평가 연구의 시간과 장소 조사에 적용하여 개인의 시간에 따른 위치를 수기로 작성하지 않아도 자동으로 기록되어 실시간으로 위치 정보를 파악할 수 있다. GPS 정보를 통해 개인의 위치를 파악할 수 있는 방법론이 개발 및 검증되었으며,²³⁾ 이는 개인노출 평가 연구에 적용되어 그 정확도를 높일 수 있다. GPS를 통한 노출의 위치 정보를 파악하여 노출평가

대상지역에서의 노출을 격자별 고해상도로 추정할 수 있는 기술은 대기확산모델, 지리정보체계(geographic information system, GIS), 토지이용회귀(land use regression, LUR) 모델, 인공지능 기법 등이 활용되고 있다. 최근 노출과 위치에 대한 정보를 활용한 인공지능 기법을 통한 노출평가 모델링 연구가 많이 진행되고 있는 추세이다.^{24,25)} GPS 장치는 현재 대부분의 사람들이 휴대하고 있는 스마트폰에 장착이 되어 쉽게 데이터를 얻을 수 있어 접근가능성이 용이하며 노출평가 연구에 더 활발하게 활용될 것이다.

최근까지 노출평가 분야는 노출의 정확한 평가에 초점을 맞추어 왔다. 이런 연구의 방향은 측정 기술의 발전, IT의 활용도, 다양한 정보의 이용 등을 통해 많은 진전을 가져왔다. 초기 노출평가는 대부분 일정 시간의 평균 노출을 측정하거나 예측하는 결과를 제공한 반면, 최근에는 실시간 노출을 측정하고 예측하는 결과를 제공하고 있어서 노출의 정확성과 정보의 해상도(resolution)를 높이게 되었다. 앞으로의 노출평가 연구는 평가된 노출 정보를 이용하여 노출의 저감, 관리, 예방의 목표를 달성하는 방향에 초점을 맞출 것이다. 노출평가의 고도화는 시공간적인 노출의 강도와 기여도를 파악할 수 있으며 특정 국소환경의 조절이나 관리를 통해 노출의 저감을 달성할 수 있다. 예를 들면 개인노출의 강도가 높아지는 국소환경이나 시간을 파악하여 특정 대상에게 공지를 함으로써 해당 장소를 피하거나 머무르는 시간을 줄일 수 있다. 최근 이동수단으로 자전거 이용시 초미세먼지에 대한 노출을 줄일 수 있는 경로를 모델링을 통해 제공하는 연구가 발표되었는데 이런 접근은 노출의 저감을 위해 활용될 수 있을 것이다.²⁶⁾

노출정보를 활용하여 특정 질환을 가진 환자군의 건강을 관리할 수 있는 중재(intervention) 연구 방법도 가능하다. 중재란, 오염물질들이 해당 국소환경에서의 권고 기준 이상으로 노출되었을 때 사용자인 사람에게 노출 정보를 제공하여 노출을 저감할 수 있도록 중재하는 것을 말한다. 국내 연구에서 실내 이산화탄소 농도를 재실자에게 제공하는 중재를 함으로써 재실자가 노출 정보를 인지하고 실내 환기를 하여 능동적으로 노출 저감에 참여하는 중재 효과를 확인하였다.^{27,28)} 천식과 같은 환경성질환의 경우 단기간의 고농도에 의해 증상이 악화될 수 있는데 이럴 경우 단기간 고농도의 노출을 미리 감지하거나 예측하여 환자에게 정보를 제공하면 천식의 악화를 예방할 수 있게 된다. 미래의 예측 기술의 접목을 통한 중재 연구를 시행한다면 사전예방 체계를 구축하여 특정 질환을 가진 민감취약 계층의 건강을 관리할 수 있을 것이다.

노출 정보의 미래 활용은 환경보건서비스(environmental health service, EHS)의 개념으로 발전되고 진행되어야 할 것이다(Supplementary Fig. S1).²⁸⁾ 기존의 노출 정보는 정부나 기관, 소수의 연구자가 주도권을 가지고 수요자인 국민에게 정보를 제공하는 방식이었다. 이제는 노출 정보의 수집과 활용에 보호

의 대상인 국민이 직접 참여하고 적극적으로 활용하도록 운영 체계를 전환할 필요가 있다. 환경보건서비스는 국가, 지역사회, 개인 등이 환경노출 정보의 창출과 제공에 직접적으로 참여하고 소통함으로써 환경오염으로부터 국민의 건강을 보호하기 위한 지식과 서비스를 도출하는 체계이다. 이런 환경보건서비스의 접근은 앞으로 노출 정보의 적극적인 활용을 통해 문제를 파악하고 해결함으로써 환경보건 증진에 기여할 것이다.

IV. 결 론

본 논문은 오염물질에 대한 노출을 평가할 수 있는 방법론에 대해 알아보고 앞으로 노출평가 연구가 나아가야 할 미래의 방향에 대해 고찰하였다. 노출은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 평가될 수 있으며 최근 기술의 발전으로 다양한 방법이 개발되어 발전하고 있다. 오염물질을 모니터링한 자료와 시간 활동양상에 대한 자료는 상당한 양의 정보로 축적되고 있으나, 이를 효율적으로 노출평가에 활용하기 위해서 체계적인 DB 관리와 데이터 사이언스 기술을 통한 가공이 필요하다. 앞으로의 노출평가가 나아가야 할 방향은 평가된 노출 정보를 이용하여 노출의 저감, 관리, 예방의 목표를 달성하는데 초점을 맞춰야 할 것이다. 또한 노출 정보의 수요자인 국민이 능동적으로 직접 정보의 수집과 적극적으로 참여하고 활용할 수 있도록 환경보건서비스의 개념을 도입하여 노출평가를 시행함으로써 환경보건 증진에 기여할 것이다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Supplementary Materials

Supplementary materials can be found via <https://doi.org/10.5668/JEHS.2022.48.3.131>

References

- Lioy PJ. Assessing total human exposure to contaminants. A multidisciplinary approach. *Environ Sci Technol*. 1990; 24(7): 938-945.
- Nieuwenhuijsen M, Paustenbach D, Duarte-Davidson R. New developments in exposure assessment: the impact on the practice of health risk assessment and epidemiological studies. *Environ Int*. 2006; 32(8): 996-1009.
- California Air Resources Board. Quality Assurance Air Monitoring Site Search. Available: <https://www.arb.ca.gov/qaweb/siteinfo.php> [accessed 1 April 2022].
- Korea Environment Corporation. AirKorea. Available: <https://www.airkorea.or.kr/web> [accessed 1 April 2022].
- Burke JM, Zufall MJ, Ozkaynak H. A population exposure model for particulate matter: case study results for PM(2.5) in Philadelphia, PA. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001; 11(6): 470-489.
- Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001; 11(3): 231-252.
- Lee H, Shuai J, Woo B, Hwang MY, Park CH, Yu SD, et al. Assessment of time activity pattern for workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2010; 20(2): 102-110.
- Yang W, Lee K, Yoon C, Yu S, Park K, Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2011; 21(3): 310-316.
- Yang W, Lee K, Park K, Yoon C, Son B, Jeon J, et al. Microenvironmental time activity patterns of weekday and weekend on Korean. *J Korean Soc Indoor Environ*. 2009; 6(4): 267-274.
- Hwang Y, Lee K, Yoon CS, Yang W, Yu S, Kim G. Determination of similar exposure groups using weekday time activity patterns of urban populations. *J Environ Health Sci*. 2016; 42(6): 353-364.
- Lee S, Lee K. Seasonal differences in determinants of time location patterns in an urban population: a large population-based study in Korea. *Int J Environ Res Public Health*. 2017; 14(7): 672.
- Ryu H, Yoon H, Eom I, Park J, Kim S, Cho M, et al. Time-activity pattern assessment for Korean students. *J Environ Health Sci*. 2018; 44(2): 143-152.
- Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, et al. Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos Environ*. 2012; 47: 407-412.
- Hwang Y, Lee K. Contribution of microenvironments to personal exposures to PM₁₀ and PM_{2.5} in summer and winter. *Atmos Environ*. 2018; 175: 192-198.
- Guak S, Lee SG, An J, Lee H, Lee K. A model for population exposure to PM_{2.5}: identification of determinants for high population exposure in Seoul. *Environ Pollut*. 2021; 285: 117406.
- Langstaff JE, United States. Environmental Protection Agency. Health and Environmental Impacts Division. Air Pollutants Exposure Model documentation (APEX, Version 5). Research Triangle Park: U.S. Environmental Protection Agency; 2017.
- Johnson TR, Langstaff JE, Graham S, Fujita EM, Campbell DE. A multipollutant evaluation of APEX using microenvironmental ozone, carbon monoxide, and particulate matter (PM_{2.5}) concentrations measured in Los Angeles by the exposure classification project. *Cogent Environ Sci*. 2018; 4: 1453022.
- Kruize H, Hänninen O, Breugelmans O, Lebret E, Jantunen M. Description and demonstration of the EXPOLIS simulation model: two examples of modeling population exposure to particulate matter. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2003; 13(2): 87-99.
- Hänninen O, Kruize H, Lebret E, Jantunen M. EXPOLIS simulation model: PM_{2.5} application and comparison with measurements in Helsinki. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2003; 13(1): 74-85.
- Valari M, Markakis K, Powaga E, Collignan B, Perrussel O. EXPLUME v1.0: a model for personal exposure to ambient O₃ and

- PM_{2.5}, *Geosci Model Dev.* 2020; 13: 1075-1094.
21. Kim Y, Lee S, Ban H, Cha S, Kim G, Lee K. Temporal variation of indoor air quality in daycare centers. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(4): 267-272.
 22. Guak S, Kim K, Yang W, Won S, Lee H, Lee K. Prediction models using outdoor environmental data for real-time PM₁₀ concentrations in daycare centers, kindergartens, and elementary schools. *Build Environ.* 2021; 187: 107371.
 23. Kim T, Lee K, Yang W, Yu SD. A new analytical method for the classification of time-location data obtained from the global positioning system (GPS). *J Environ Monit.* 2012; 14(8): 2270-2274.
 24. Zhao Y, Cai J, Zhu X, van Donkelaar A, Martin RV, Hua J, et al. Fine particulate matter exposure and renal function: a population-based study among pregnant women in China. *Environ Int.* 2020; 141: 105805.
 25. Lim CC, Kim H, Vilcassim MJR, Thurston GD, Gordon T, Chen LC, et al. Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea. *Environ Int.* 2019; 131: 105022.
 26. Wu TG, Chen YD, Chen BH, Harada KH, Lee K, Deng F, et al. Identifying low-PM_{2.5} exposure commuting routes for cyclists through modeling with the random forest algorithm based on low-cost sensor measurements in three Asian cities. *Environ Pollut.* 2022; 294: 118597.
 27. Kim KC, Park CS, Kim IH. Response of occupants to indoor environmental information. *J Archit Inst Korea Plan Des.* 2013; 29(7): 229-237.
 28. National Institute of Environmental Research. Planning of Environmental Health 100+ Services. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2013.

〈저자정보〉

곽수영(박사), 이기영(교수)