

흡입 노출 모델 알고리즘의 구성과 시나리오 노출량 비교

박지훈¹ · 윤충식^{2*}

¹한국과학기술연구원 유럽연구소 환경안전성연구단, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과, 보건환경연구소

Model Algorithms for Estimates of Inhalation Exposure and Comparison between Exposure Estimates from Each Model

Jihoon Park¹ · Chungsik Yoon^{2*}

¹Environmental Safety Group, Korea Institute of Science and Technology Europe Forschungsgesellschaft mbH,

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

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to review model algorithms and input parameters applied to some exposure models and to compare the simulated estimates using an exposure scenario from each model.

Methods: A total of five exposure models which can estimate inhalation exposure were selected; the Korea Ministry of Environment(KMOE) exposure model, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment(ECETOC TRA), SprayExpo, and ConsExpo model. Algorithms and input parameters for exposure estimation were reviewed and the exposure scenario was used for comparing the modeled estimates.

Results: Algorithms in each model commonly consist of the function combining physicochemical properties, use characteristics, user exposure factors, and environmental factors. The outputs including air concentration (mg/m³) and inhaled dose(mg/kg/day) are estimated applying input parameters with the common factors to the algorithm. In particular, the input parameters needed to estimate are complicated among the models and models need more individual input parameters in addition to common factors. In case of CEM, it can be obtained more detailed exposure estimates separating user's breathing zone(near-field) and those at influencing zone(far-field) by two-box model. The modeled exposure estimates using the exposure scenario were similar between the models; they were ranged from 0.82 to 1.38 mg/m³ for concentration and from 0.015 to 0.180 mg/kg/day for inhaled dose, respectively.

Conclusions: Modeling technique can be used for a useful tool in the process of exposure assessment if the exposure data are scarce, but it is necessary to consider proper input parameters and exposure scenario which can affect the real exposure conditions.

Key words: Exposure model, inhalation, aerosol, algorithm, exposure scenario


I. 서 론


노출 평가는 위해성 평가에서 가장 중요한 단계이며 노출의 정량은 노출되는 농도와 시간의 함수로 표현할 수 있다. 노출 정도를 정량적 수치로 제시할 수 있으나

실제 노출 경로에서는 유해 물질과 접하는 수용체와 수용체를 둘러싼 환경, 시간 등 수 많은 변수들이 복잡하게 얽혀 있다. 이처럼 복잡한 노출 환경의 특성을 고려하여 실제 노출 평가에서는 수용체의 건강에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 상황 또는 근원에 초점을 맞춘

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2729, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
Received: August 16, 2019, Revised: September 4, 2019, Accepted: September 23, 2019

 Jihoon Park <https://orcid.org/0000-0002-4829-5587>

 Chungsik Yoon <https://orcid.org/0000-0001-7822-0079>

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.

고도의 전략이 요구된다.

환경 중 유해 물질에 대한 노출 경로는 흡입(inhalation), 피부 흡수(dermal absorption), 섭취(ingestion)가 있다. 이 중 일반 환경이나 작업장에서의 주요 노출 경로인 흡입은 호흡기를 통한 유해 물질의 직접 침투 및 체내 흡수로 인한 위험이 높으므로 노출 평가에서 매우 중요하다(Nickmilder et al., 2007; Park et al., 2017b). 호흡기 흡입을 통해 건강상 위험을 유발할 수 있는 환경 유해인자 중 에어로졸은 작업장에서의 직업 노출에서부터 일반 소비자의 생활 노출에 이르기까지 노출 가능성이 높다(Eickmann et al., 2007). 작업장 내 스프레이 도장 공정이나 일상 생활에서 사용하는 생활화학제품으로부터 발생하는 분사 에어로졸의 크기 분포는 분사 형태(spray can vs. hand pump spray)에 따라 달라지는데, 작게는 나노미터 크기부터 크게는 수 백 마이크로미터 크기의 입자가 공기 중으로 분사된다. 유해 물질의 입자 크기가 작을수록 공기 중에서 체류하는 기간이 길어지기 때문에, 결국 분사되는 입자의 크기가 해당 공간에서의 작업자 또는 사용자의 흡입 노출에 결정적 영향을 미칠 수 있다(Bekker et al., 2014; Lorenz et al., 2011; Losert et al., 2014; Park et al., 2017a).

흡입 노출에 대한 평가방법으로 대상 유해 인자를 직접 측정할 수 있으나, 이 방법은 노출 당시의 상황을 직접 모니터링할 수 있는 장점이 있는 반면에 접근성, 비용, 상황의 일반화 및 과거 노출 추정치의 어려움이 있다. 모델을 이용한 노출 추정 방법은 노출 측정 자료가 부족할 경우에 부차적 대안으로 활용이 가능한데, 시공간적 제한, 대상(population)의 규모와 비용 등에 구애받지 않고 쉽고 빠른 결과를 도출해 낼 수 있는 장점이 있다(WHO, 2005; Donnell et al., 2011). 반대로 모델링 기법은 결과의 정확도(또는 불확실성)에 대한 검증이 필요하며, 각 모델이 구성하고 있는 기본 알고리즘과 모델링 과정에서 요구되는 입력 변수(input parameter)에 따라 결과 값이 크게 차이를 보일 수 있다(RIVM, 2009; Delmaar et al., 2013; Riedmann et al., 2015). 따라서 모델링 방법을 이용한 노출량 추정을 위해서는 우선 목적에 부합하는 모델의 선정과 각 모델에서 요구되는 변수정보들을 면밀히 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존에 제시된 사용자 편의적(user-friendly) 노출 모델 중 분사 에어로졸에 대한 노출 추

정이 가능한 대표적 모델 일부를 선정하여 흡입 노출을 추정하기 위한 기본 알고리즘과 모델링에 필요한 조건 변수에 대한 분석을 통해 각 모델의 주요 특성을 검토하였다. 또한 임의의 노출 시나리오를 작성하여 각 모델에 적용함으로써 모델 별 흡입 노출 추정 결과를 비교, 고찰하였다.

II. 대상 및 방법

1. 흡입 노출 모델 알고리즘 및 입력 변수 검토

현재까지 제시되어 있는 노출 모델 중 직업 노출과 일반 소비자 노출(환경 노출 포함)을 평가할 수 있는 일부 모델을 선정하였다. 특히, 최종 결과 값을 정량적인 수치로 얻을 수 있는 모델을 우선 선정하였고, 모든 노출 경로 중 흡입 노출 경로에 중점을 두었다. 선정된 모델은 우리나라 환경부에서 제시하고 있는 노출 모델 알고리즘과 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 Consumer Exposure Model(CEM), 유럽화학물질독성센터(European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, ECETOC)의 Targeted Risk Assessment (TRA) 모델, 독일연방안전보건청(Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA)의 Spray Expo 모델, 네덜란드 보건환경연구원(Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM)에서 개발한 ConsExpo 모델 등 총 5개 모델이다. 각 모델의 개발 기관에서 제시하고 있는 모델 설명서(매뉴얼) 또는 관련 보고서를 참고하여 각 모델에서 노출량 산정에 적용되는 기본 알고리즘 수식과 입력 변수를 검토, 비교하였다.

2. 노출 시나리오 상 흡입 노출 추정량 비교

각 모델의 흡입 노출 추정 값을 비교하기 위해 임의의 노출 시나리오를 설정하였다(Table 1). 시나리오에는 본 연구진이 과거에 수행했던 실제 노출 실험 자료와 모델 추정 값 간 비교 연구에 기반하여 각 모델에 공통으로 적용할 수 있는 입력 변수를 활용하였다(Park et al., 2018). 또한 앞 단계에서 파악된 각 흡입 노출 모델의 알고리즘의 구성요소와 모델링에 필요한 입력 변수를 고려하여 모든 모델에 공통으로 적용되는 입력 변수 외에 개별 모델마다 단독으로 필요한 개별 변수를 설정하였

Table 1. Exposure scenario for comparison of output values between each model

	Content	Input parameter		
		Substance	Aerosols mixed with ethanol	
Exposure scenario	Chemical properties	Weight of fraction (%)	10	
		Airborne fraction (%)	10	
		Sprayed amount (g)	25	
	Use characteristics	Frequency of use (event/day)	1	
		Duration of use (min)	20	
		Exposure duration (min)	120	
	Common exposure factor*	User exposure factor	Inhalation rate (m ³ /h)	0.6
			Body weight (kg)	65
			Use environment	Living room
	Environmental factor	Building volume (m ³)	500	
		Room volume (m ³)	40	
		Room height (m)	2.5	
		Air exchange rate (/h)	3	
		Dispersion condition [†]	Homogeneous	
Individual factor [‡]	- CEM: User, Adults (≥ 21 years); Background air concentration, 0.05 mg/m ³ ; Near-field exposure option (volume: 1 m ³).			
	- ECETOC TRA: Inhalation reference value, 0.05 mg/m ³ ; Exposed body part, upper body			
	- SprayExpo: Turbulent diffusion, 0.01 m ² /s; Room application; Droplet spectrum, 0–5 μm 80%, 5–10 μm 10%, 10–20 μm, 5%, 20–40 μm, 5%; Spray angle 30; Spray nozzle diameter, 0.5 mm; Spray duration: 120 sec			
	- ConsExpo: Density of non-volatile, 1 g/cm ³ ; Inhalation cut off diameter, 10 μm; Aerosol distribution, log-normal; Median diameter, 1 μm; Maximum diameter, 100 μm			

*Common input parameters used in all models, [†] The statue of aerosol distribution in the space, [‡] Individual input parameters in addition to common exposure factors in each model.

다. 모델의 공통 입력 변수의 구성 항목은 크게 대상 화학물질의 기본 정보(해당 물질의 물리화학적 특성, 함유량, 공기 중 부유 비율 등)와 해당 분사형 제품 또는 분사 공정에서의 사용 특성(분사량, 사용 빈도, 사용 시간), 사용자 노출 특성(노출 시간, 호흡률, 체중)과 분사 장소의 환경 요인(사용 장소, 공간의 체적, 공기 교환율, 분사 에어로졸의 분포 특성)이 포함된다. 기타 개별 모델에서 입력이 요구되는 변수들은 모든 모델에서 요구되는 변수가 아니라 어떤 모델에서 개별적으로 추가 입력이 요구되는 변수를 의미한다(Table 1, Individual factor 참조). 노출 추정 비교는 환경부 노출 모델 수식과 CEM ver. 1.4, ECETOC TRA ver. 1.3, SprayExpo ver. 2.3, ConsExpo Web 모델(<https://www.consexpoweb.nl/>) 소프트웨어 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흡입 노출 모델 별 기본 알고리즘

우리나라는 국립환경과학원 고시를 통해 노출 모델 알고리즘 수식을 규정하고 있으며, 이 외 CEM과 TRA, SprayExpo 모델은 개별 소프트웨어 프로그램을 개발하여 제공하고 있다. ConsExpo 모델의 경우에는 5.0 베타 버전까지 소프트웨어를 제공하였으나, 최근에는 웹 기반(online)형태의 홈페이지에서 직접 조건 변수들을 입력하여 노출 결과 값을 얻을 수 있다. 각 노출 모델과 기본 알고리즘에 관한 내용은 다음과 같다.

1) 우리나라 환경부 흡입 노출 모델

우리나라는 국립환경과학원 고시(제2018-70호)의 제

9조 노출 평가 조항에서 흡입, 경피, 섭취 등 노출 경로 별 노출량 산정을 위한 알고리즘(별표 5)을 규정하고 있는데, 이 중 흡입 노출은 초기 평가와 상세 평가로 단계를 구분한다(NIER, 2018). 초기 평가는 최악의 노출 상황(worst case)을 가정하여 최대 제품 사용가능 시나리오에 따라 보수적으로 평가하며, 상세 평가는 제품의 실제 사용 특성을 최대한 반영함으로써 실제 노출 상황에 가깝게 평가하는데 적용할 수 있다. 이 때 본 고시 제9조 제5항의 규정에 따라 일반 노출 계수(별표 6)와 제품 노출 계수(별표 7)를 이용하여 노출의 직접 측정 절차 없이 흡입 노출량을 추정할 수 있다.

노출 알고리즘의 기본 산출식을 이용하여 공기 중 흡입 농도와 노출 추정량을 구할 수 있는데, 이 때, 공기 중 에어로졸에 대한 흡입 농도는 공기 중으로 분사된 물질의 비율과 전체 구성물질 중 해당 물질의 구성비율, 사용빈도, 노출 시간, 공기 교환율과 공간 체적의 함수로 구성된 공기 중 농도와 노출 시간의 비를 의미하며, 중량 단위(mg/m^3)로 표현된다. 또한 공기 중 농도 값은 노출자의 호흡률과 노출시간, 체중을 함께 적용하여 최종적으로 단위 체중 당 흡입 노출량($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$) 추정이 가능하다(Table 2). 우리나라 노출 모델은 비교적 간략한 수식 알고리즘과 노출 계수를 이용하여 간편하고 쉽게 추정할 수 있으나, 해당 대상 물질이 휘발성 물질인지, 또는 비 휘발성 입자인지 여부를 명확히 구분하기 어렵다. 또한 사용되는 변수의 값을 별표 6과 7에서 제시하는 노출 계수를 이용하기 때문에, 노출 계수의 정확성에 따라 최종 결과 값의 정확성이 좌우되기 쉬운 단점이 있다.

2) CEM

CEM은 모든 노출 경로에 대한 노출 추정이 가능하다. USEPA에서 제공하는 소프트웨어에는 기본적으로 6개의 흡입 노출 모델(INH01-06)과 5개의 경구 노출 모델(ING01-05), 그리고 4개의 경피 노출 모델(DER01-04)이 내장되어 있어 사용자가 편리하게 선택하여 노출 추정 과정을 진행할 수 있는데, 이 중 분사 에어로졸에 대한 노출량 추정은 INH03-Product sprayed 시나리오를 이용한다. CEM 알고리즘의 구성은 우리나라 환경부 노출 알고리즘과 거의 유사하게 농도와 노출 시간, 호흡률, 체중의 함수로 나타낼 수 있다(USEPA, 2012). 본 모델이 가지는 주요 특징은 다음과 같이 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저, 제품(product, PC) 또는 재료(article,

AC)로부터 발생하는 공기 중 가스상, 입자상의 휘발성 물질(semi-volatile organic compounds, SVOCs)의 양을 질량균형모델(mass balanced model)을 적용하여 구할 수 있다는 점이다. 즉, Table 2의 CEM알고리즘 수식에 나타난 것과 같이 가스상 물질($C_{\text{gas_avg}}$)과 입자상 물질 농도(SVOCTSP)에 대한 입력 변수가 적용됨으로써 최종 노출 추정 값($\text{CADD}_{\text{Total}}/\text{ADR}_{\text{Total}}$)에 대한 과대평가 위험을 줄일 수 있다. 다음, 알고리즘 수식의 구성 요소 중 CEM이 가지는 또 다른 특징은 장시간 평균 만성 노출량(chronic average daily dose, CADD, $\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)과 일일 평균 급성 노출량(potential acute dose rate, ADR, $\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$) 추정이 가능하다는 점이다. 끝으로, 모델 내부 옵션으로 근거리장(near-field, zone 1) 노출과 원거리장(far-field, zone 2) 노출 설정이 가능하여 사용자의 호흡기 영역에서 예상되는 고농도 노출과 공간 내 근거리장 이외에 상대적으로 저농도 노출이 예상되는 원거리에서의 노출 구분이 가능한 Two box 모델의 구현이 가능하다(Steiling et al., 2014; Huang et al., 2017). 본 옵션은 다른 모델에서 공기 중 유해물질이 공간 내 균일하게 분포(well mixed/homogeneously distributed)되어 있는 것을 가정하는 One box 모델과는 구별되는 특징으로, 고려되는 입력 변수가 많아 사용자의 노출을 좀 더 실제에 가깝게 상세한 평가가 가능하다.

3) ECETOC TRA

ECETOC TRA모델은 유럽의 REACH(Registration, Evaluation, Authorisation & Restriction of Chemicals) 제도 내에서 관리되는 화학제품의 위험성 평가를 위한 목적으로 개발되었으며(ECHA, 2008), 이해관계자가 쉽고 간편하게 활용할 수 있도록 일부 변수만을 입력하여 최종 노출 추정 값을 얻을 수 있다. ECETOC TRA를 이용한 노출 추정 절차는 물질의 확인(제1단계), 물질의 물리화학적 특성 정보의 입력(제2단계), 사용자의 노출시나리오 입력(제3단계) 단계로 진행된다. 특히 제3단계에서 노출 시나리오 대상을 작업자, 일반 소비자, 환경 노출로 구분하여 입력함으로써 각 대상에 맞는 노출 추정이 가능하다(NIER, 2016). 기본 알고리즘의 구성은 성분비와 유효 성분의 공기 중 체적 비율, 사용량, 사용빈도, 노출시간, 호흡률에 대한 공간 체적과 체중의 함수 관계를 통해 공기 중 노출 농도(mg/m^3)와 일일 호흡 노출량($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)을 얻을 수 있다(ECETOC,

2014). TRA모델은 방대한 과거 노출 자료를 반영하여 10개 제품(PC)군과 6개 재료(AC)군 등 총 46개 제품이 소프트웨어 내에 기본적으로 내장되어 있어 목적에 맞게 선택하여 진행할 수 있는데, 분사 에어로졸의 경우 PC3(Air care products)과 PC9a(Coatings, paints, thinners, removers)항목의 하위 범주에서 선택하여 노출 추정이 가능하다.

4) SprayExpo model

분사 에어로졸에 대한 전용 평가 도구인 SprayExpo 모델은 원래 살충제에 함유된 비 휘발성 물질에 대한 흡입 노출 추정을 목적으로 개발되었다. 기본적으로 제품 내 임의의 비 휘발 성분이 휘발 성분의 용매에 함유되어 있는 것을 가정한다. 본 모델의 가장 큰 특징으로는 스프레이 공정 또는 제품을 사용하는 공간 내 3차원(x, y, z축)의 입체적 노출 추정이 가능하며, 공기 중 입자의 노출 농도를 흡입성(inhalable), 흉곽성(thoracic), 호흡성(respirable)크기로 구분하여 추정이 가능하다(BAuA, 2019). SprayExpo모델의 공기 중 노출 농도를 추정하는 알고리즘에서는 세 개의 축과 각 위치에서의 분사 시간 및 노출 시간을 고려하여 최종 노출 농도를 결정한다(Table 2). 이 때 알고리즘의 구성은 분사 직후 초기(t)의 입자 크기 별 노출 농도(G_i)와 이후 일정 시간이 지난 후(t')공기 중에 부유하는 입자의 농도로 이루어지며, 각 농도를 3차원 위치와 시간의 적분 함수를 적용하여 최종 노출 농도를 결정할 수 있다. 여기서 산출된 3차원 노출 농도의 합과 시간의 적분 함수를 사용자의 호흡률(Q_{resp})을 적용하여 최종 흡입 노출량(D_{inh})을 추정할 수 있다.

5) ConsExpo (web)

ConsExpo 모델은 분사형 제품에 대한 정보와 과거 노출 자료를 이용하여 신뢰성 있는 노출 평가 방법을 고안하기 위해 개발되었다. 본 모델의 검증, 즉 노출 추정 자료와 실제 노출의 관계를 규명하기 위해 수 많은 실험 단계를 수행하여 알고리즘에 반영하였다. ConsExpo로부터 최종 얻을 수 있는 결과는 흡입 노출 농도와 흡입 노출 추정 값이다. 흡입 노출 농도와 노출량을 추정하기 위한 기본 알고리즘의 개념은 환경부 모델, CEM, ECETOC TRA모델과 유사하다. 농도 알고리즘은 $20 \mu m$ 이하의 흡입성 크기의 입자의 비율($f_{airborne(20 \mu m)}$)과 공기 중으로 분사된 양(mg), 공간의 체적, 임의의 입자

크기(δ)에서의 확률밀도함수($P(\delta)$), 입자의 종단 속도(v_s)와 공간 높이, 환기량과 노출 시간의 함수로 구성된다. 노출 알고리즘에서는 실제로 사용자의 특성 함수(호흡률, 빈도, 체중)가 적용되지 않기 때문에, 시간 당 공기 중 발생율($R_{airborne}$)과 공기 교환율, 입자의 종단 속도 함수를 이용하여 공기 중에서 부유하는 유해 물질의 중량(mg)을 구할 수 있다(RIVM, 2005; RIVM, 2009; RIVM, 2010). 따라서 ConsExpo를 이용하여 사용자의 최종 흡입 노출량(mg/kg/day)을 추정할 경우에는 사용자의 호흡률과 체중, 일일 사용빈도와 노출 시간을 공기 중 유해물질의 중량에 별도로 적용해야 한다.

2. 각 모델 별 입력 변수(input parameter)검토

각 모델의 기본 노출 알고리즘은 보통 단순한 형태로 제시되고 있으나, 알고리즘 개별 요소를 도출하기 위해서는 많은 입력 변수가 조합 되어야 한다. 모든 모델에서 필요로 하는 공통 변수는 크게 해당 유해물질의 기본 정보(물리화학적 특성)와 사용 특성(사용빈도, 사용 시간, 사용량 등), 사용자 특성(호흡률, 체중, 노출 시간 등)과 기타 환경 요인(공간 특성)으로 구분할 수 있다(Table 3). 이 외에 개별 모델에서 필요로 하는 추가 입력 변수를 적용해야 한다(Table 1, Individual factor 부분 참조). 우리나라 환경부 노출 모델은 소프트웨어 프로그램 형태로 제시되는 것이 아니라 다른 모델과는 달리 입력 변수 대신 별표로 제시되는 노출 계수를 이용한다. 국립환경과학원 고시(제2018-70호)의 별표6과 7에서 일반 노출 계수와 제품 노출 계수를 제시하고 있는데, 이를 노출 모델의 각 입력 변수로 적용하여 최종 흡입 노출 농도와 노출량을 추정할 수 있다. 그러나 노출 계수는 실제 측정을 통한 실험 값에 의해 도출된 값으로, 단순한 수치 형태로 사용하지만 수 많은 측정 자료가 조합된 값들이다. 따라서 복잡한 입력 변수 못지 않게 노출 추정에 결정적인 요소이나 실제 사용자의 노출 양상의 변이가 큰 점을 감안하면 한 가지의 대표 수치로 제시되는 노출 계수의 정확성을 확보하기는 쉽지 않은 단점이 있다.

각 모델에서 요구하는 물질에 대한 정보는 물리화학적 특성, 제품 내 해당 물질의 성분 중량비와 공기 중 에서 부유하는 해당 물질의 비율로 축약할 수 있다(Table 3). 물리화학적 특성 정보는 객관적인 값으로, 모델에 내장된 값(default)을 이용하거나 직접 안전보건자료를 검색하여 입력할 수 있다. 우리나라 환경부

Table 2. Summary of basic algorithms in each exposure model (BAuA, 2019; ECETOC, 2014; NIER, 2018; RIVM, 2009; USEPA, 2012)

Model (Country)	Basic algorithms	Parameter description
KMOE Exposure model (South Korea)	(1) Screening: $C_a = \frac{A_p \times W_f}{V}$ (2) Detailed: $C_a = \frac{A_p \times W_f \times F_{air} \times [1 - \exp(-N \times t)]}{V \times N}$ (3) Concentration: $C_{inh} = C_a \times t \times n / 24$ (4) Exposure dose: $D_{inh}(mg/kg, d) = C_a \times IR \times t \times n / BW$	C_a , airborne concentration (mg/m^3); W_f : ingredient proportion; N , ventilation rate (/h); V , room volume (m^3); IR , inhalation rate (m^3/h); A_p , sprayed amount (mg); F_{air} , airborne proportion; n , use frequency (event/day); t , exposure time (h); Bw , body weight (kg); C_{inh} , inhaled concentration (mg/m^3); D_{inh} , inhaled dose ($mg/kg/day$)
CEM (United States)	(1) $CADD_{air} = \frac{C_{gas_avg} \times FracTime \times InhalAfter \times CF_1}{BW \times CF_2}$ $CADD_{particulate} = \frac{SVOC TSP_{air_avg} \times TSP_{air_avg} \times FracTime \times InhalAfter \times CF_1}{BW \times CF_2}$ $CADD_{Total} = CADD_{air} \times CADD_{particulate}$ (2) $ADR_{air} = \frac{C_{gas_max} \times FracTime \times InhalAfter \times CF_1}{BW \times CF_2}$ $ADR_{particulate} = \frac{SVOC TSP_{air_max} \times TSP_{air_avg} \times FracTime \times InhalAfter \times CF_1}{BW \times CF_2}$ $ADR_{Total} = ADR_{air} \times ADR_{particulate}$	$CADD_{air}$, chronic average daily dose in the air ($mg/kg/day$); C_{gas_avg} , average gas phase concentration ($\mu g/m^3$); $FracTime$, fraction of time in environment (unitless); $InhalAfter$, Inhalation rate after use (m^3/hr); CF_1 , conversion factor (24 hrs/day); CF_2 , conversion factor (1,000 $\mu g/mg$); BW , body weight (kg); $CADD_{particulate}$, chronic average daily dose of particulate ($mg/kg/day$); $SVOC TSP_{air_avg}$, average SVOC in TSP concentration in the air ($\mu g/mg$); TSP_{air_avg} , average TSP concentration in the air (mg/m^3); $CADD_{Total}$, potential chronic average daily dose of total air ($mg/kg/day$); ADR_{air} , potential acute dose rate in the air ($mg/kg/day$); C_{gas_max} , max gas phase concentration; $ADR_{particulate}$, potential acute dose rate of particulate ($mg/kg/day$); $SVOC TSP_{air_max}$, maximum SVOC in TSP concentration in the air ($\mu g/mg$); ADR_{Total} , potential acute dose rate of total air ($mg/kg/day$)
ECETOC TRA (EU)	$E = (PI \times A \times FQ \times F \times DF \times ET \times IR \times 1,000) / (V \times BW)$	E , exposure dose ($mg/kg/day$); PI , product ingredient (g/g); A , amount used per application (g/event); FQ , use frequency (event/day); F , airborne fraction (f/f); DF , dilution fraction (unitless); ET , exposure time (h); IR , inhalation rate (m^3/h); 1,000, conversion factor; V , room volume (m^3); Bw , body weight (kg)
SprayExpo (Germany)	(1) $C(x, y, z, t) = \int_0^t dt' \sum_{i=1}^N G_i(x(t), y(t), z(t), xS(t'), yS(t'), zS(t'), t - t') \cdot Q_i(t')$ (2) $D_{inh} = Q_{resp} \int_0^{t_n} dt C[xR(t), yR(t), zR]$	$C(x, y, z, t)$, time dependent concentration at each location; G_i , concentration of droplets of initial diameter; $S(t')$, concentration of suspended droplets; $Q_i(t)$, time dependent source strength; D_{inh} , inhalation dose ($mg/kg/day$); Q_{resp} , respiratory volume (10 L/min),
ConsExpo (Netherlands)	(1) $C_{air}(t) = f_{airborne < 20\mu m} \times \frac{M_{tot}}{V_{room}} \sum_{\delta} P(\delta) \times \Delta \delta \times e^{-\left(\frac{v_s(\delta)}{h} + q\right)t}$ (2) $A_{air}(\delta, t) = (R_{airborne}(\delta)) / (q_{vent} + \frac{v_s(\delta)}{h}) \times (1 - \exp(-\left(q_{vent} + \frac{v_s(\delta)}{h}\right)t))$	C_{air} , room air concentration (mg/m^3); $f_{airborne < 20\mu m}$, fraction of respirable (less than 20 μm) aerosols (unitless); M_{tot} , total mass of sprayed aerosols (mg); V_{room} , room volume (m^3); $P(\delta)$, probability density function for aerosol with diameter δ (unitless); A_{air} , mass of airborne droplets with diameter δ (mg); $R_{airborne}$, rate of released mass in droplets (g/s); q_{vent} , ventilation rate (/h); v_s , Stoke's settling velocity (m/s); h , room height (m); t , exposure time (sec)

Abbreviations: KMOE, Korea Ministry of Environment; CEM, Consumer Exposure Model; USEPA, United States Environmental Protection Agency; ECETOC TRA, European Centre for Ecotoxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment; SVOC, semi volatile organic compound; TSP, total suspended particulate.

모델의 경우 수식을 이용하기 때문에, 해당 물질에 대한 물리화학적 특성 정보를 이용하는 것이 제한적이다. 따라서 물질의 중량비와 공기 중 부유 비율 만을 이용하며, 휘발성 물질과 비 휘발성 물질의 구분이 어렵다. 반면, CEM과 TRA의 모델은 물질의 정보는 물론, 제품 또는 재료인지 여부를 제품(재료)군의 하위 범주를 통해 좀 더 상세한 정보 입력이 가능하며, 에어로졸이 제품으로부터 지속적으로 또는 간헐적으로 분사되는 형태로 발생하는지 여부를 선택할 수 있다. 다른 모델과는 달리 SprayExpo 모델이 가지는 특징은 휘발성 용매에

함유된 비 휘발성 물질에 대한 평가가 가능하다는 점이다. 또한 분사된 에어로졸에 대한 입자 크기 분포 정보가 있을 경우 이를 이용하여 입자 크기 별 노출 정보를 파악할 수 있는 장점이 있다.

각 모델에서 사용되는 사용 특성과 사용자 노출 특성 변수로는 개별 모델마다 다소 차이는 있으나 공기 중으로 분사된 물질의 중량과 사용 빈도, 사용 시간, 노출 시간, 호흡률, 체중에 대한 정보가 공통적으로 적용된다 (Table 3). 특히, CEM과 SprayExpo, ConsExpo 모델은 상세한 정보가 필요하다. CEM은 사용자 노출 특

Table 3. Comparison of essential input parameters for exposure modeling

Model	Input parameters				Final output
	Chemical properties	Use characteristics	User exposure factor	Environmental factor	
MOE Exposure model*	- Weight fraction of substance - Airborne fraction	- Sprayed amount - Frequency of use	- Inhalation rate - Body weight - Exposure time	- Room volume - Ventilation rate	- Air concentration (mg/m ³) - Inhaled dose (mg/kg/day)
CEM	- Physicochemical properties - Product or article used	- Frequency of use - Duration of use - Mass of product use	- User (adult/youth/child) - Exposure duration (chronic/acute) - Inhalation rate - Body weight - Time activity pattern in each environment	- Use environment (residence/office and school/automobile/outside) - Building volume - Use environment volume - Air exchange rate (Ventilation) - Background air concentration - Background dust concentration - (option) Near field or far field environment	- Air concentration (mg/m ³) - Acute dose rate (mg/kg/day) - Chronic dose rate (mg/kg/day)
ECETOC TRA	- Physicochemical properties - Product subcategory (PC/AC) - Spray type or not - Weight fraction of substance	- Frequency of use - Mass of product use	- User (adult/child) - Inhalation rate - Body weight - Exposure time	- Use environment (indoor/outdoor) - Room volume - Airborne fraction	- Air concentration (mg/m ³) - Exposure dose (mg/kg/day)
SprayExpo	- Non evaporation fraction - Vapor pressure of solvent - Droplet spectrum (fractions in each size range)	- Application patterns (wall line/wall area /ceiling/floor/room) - Spray nozzle characterization (spray angle/area/diameter) - Release rate - Spray length	- N/A [†]	- Room size (length/width/height) - Ventilation rate - Turbulent diffusion	- Inhaled dose (total/inhalable/thoracic/respirable, mg) - Time average concentration (mg/m ³)
ConsExpo	- Physicochemical properties - Weight fraction of substance - Aerosol information	- Release mode (instantaneous release/spraying) - Spray duration - Frequency of use	- Inhalation rate [‡] - Body weight [‡] - Exposure duration [‡] - (option) Spraying towards exposed person	- Room volume/height - Ventilation rate - Airborne fraction	- Mean event concentration (mg/m ³) - Peak concentration (mg/m ³) - External event dose (mg)

Abbreviations: PC, product category; AC, article category, N/A, not applicable.

* Exposure factors provided in the regulation can be applied for estimating the exposure when the KMOE exposure model is used. [†] There are no input parameters for user exposure factors in the SprayExpo model, so the factors should be additionally applied to final inhaled dose(mg). [‡] Factors related to personal exposure characteristics should be applied to estimate the final inhaled dose(mg).

성 변수에서 성인, 어린이, 유아로 구분이 가능하며, 일일 평균 급성 노출과 만성 노출을 동시에 산출할 수 있다. 동시에 하루 24시간을 1시간 단위로 구분하여 개별 활동 장소에서의 시간 활동 패턴(time activity pattern)을 지정할 수 있어 정밀한 평가가 가능하다. 분사형 에어로졸에 특화된 SprayExpo 모델은 사용 특성 변수에서 상세한 정보가 요구된다. 표면 라인을 따라 분사가 되는지, 또는 벽면 분사, 천장, 바닥, 공간 내 공기 중 분사인지 여부를 선택할 수 있으며, 분사 각도와 분사구의 넓이와 직경 등 에어로졸 발생에서 가장 중요한 분사 노출에 대한 정보도 필요하다. 특히, 공기 중 분사일 경우에는 분사구로부터 공기 중으로 분사되는 직선 거리(spray length)까지 고려되기 때문에 더 상세한 노출 추정이 가능하다. ConsExpo 모델은 에어로졸의 분사 형태가 지속적으로 분사되는 형태인지, 간헐적 분사 형태인지를 구분할 수 있는데, 제품의 용도가 사람을 향해 분사되는 제품일 경우 인체 분사 옵션으로 지정하여 평가할 수 있다.

분사 에어로졸이 발생하는 장소에서의 환경 조건 또한 노출 추정에서 매우 중요한 변수이다. 각 모델에 공통적으로 적용되는 환경 변수는 공간 체적과 시간당 공기 교환율(환기 상태)이다(Table 3). 특히, 다른 모델이 공간 체적과 시간당 공기 교환율만을 적용하는데 비해, CEM은 더 많은 정보가 필요하다. 먼저 활동 공간을 주거지, 사무실, 학교, 자동차, 실외로 세분화할 수 있고, 활동이 이루어지는 공간을 포함하여 건물 전체에 대한 체적 정보도 필요하다. 그리고 에어로졸 거동에 영향을

줄 수 있는 배경 농도(background concentration)에 대한 정보와 Two box 모델을 옵션으로 적용하여 사용자 노출(near-field exposure)과 사용자 외 노출(far-field exposure)에 대한 정보를 동시에 얻을 수 있다(Losert et al., 2014; Steiling et al., 2014; Huang et al., 2017).

모델링을 이용한 노출 추정에서 가장 중요한 요소는 각 모델이 요구하는 입력 변수의 종류와 정확한 정보이다. 앞서 기술한 바와 같이 각 모델 별로 요구하는 공통 입력 변수 외에도 개별적으로 필요한 변수들이 많아 노출 추정 과정에서는 많은 정보가 필요하다(Table 1&3). 따라서 우리가 얻고자 하는 정확한 노출 추정 값은 결국 입력 변수에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

3. 가상 노출 시나리오에 따른 모델 별 흡입 노출량 추정

Table 1에서 제시한 임의의 노출 시나리오를 각 모델에 적용하여 공기 중 노출 농도와 흡입 노출량을 추정한 결과, 최종 추정 값 간의 큰 차이는 없었다(Fig. 1). 공기 중 농도의 추정 값은 CEM을 제외한 모든 모델에서 약 1 mg/m³ 내외(range; 0.82 - 1.38)의 범위에서 분포하였다. 노출 추정량의 범위는 0.015-0.180 mg/kg/day로 CEM의 결과 값이 상대적으로 높았으나 전체적으로 현저한 차이는 보이지 않았다. 이는 노출 시나리오 상 해당 공간에 부유하는 분사 에어로졸은 고르게 분포되어 있는 상태로 가정하였기 때문에 노출 추정 값 또한 거의 유사하게 도출된 것으로 보인다. 그러나 CEM 모델에서 Two-box 모델 옵션이 적용될 경우에

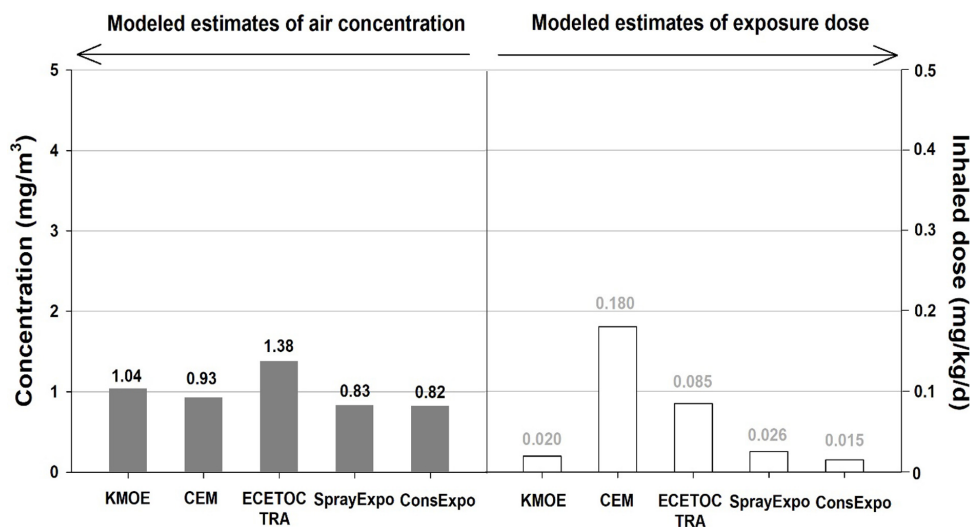


Figure 1. Comparison of each modeled estimate using the exposure scenario

는 실제 사용자 호흡기 영역(near-field)에서의 공기 중 농도와 흡입 노출 추정량은 더욱 증가할 것으로 예상된다.

모델을 이용하는 노출 추정 방법은 노출 자료가 부족하거나 실측이 어려운 상황에서 적절히 활용할 수 있다. 본 연구에서는 가상의 노출 시나리오만을 이용하여 각 모델의 흡입 노출을 추정, 비교하였고, 실제 도출된 모델 추정 값들도 모두 비슷한 수준을 보였다. 그러나 추정 값들 간 정밀도도 중요하지만 모델에 의해 도출된 결과 값들이 실제 노출을 신뢰성 있게 반영할 수 있는지에 따라 모델의 활용 효과가 크게 달라질 수 있다. 모델의 정확도 확보를 위해서는 실제 노출 측정 자료를 입력 변수로 활용하여 도출된 결과에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 이에 따라 모델 개발기관에서도 소프트웨어에 내장된 입력 변수와 알고리즘을 실제 측정을 통해 지속적으로 수정, 보완하는 과정을 거치고 있다. 모델의 활용면에서는 노출 상황이 잘 반영된 시나리오 작성과 더불어 각 모델의 특성을 고려하여 목적에 맞는 모델을 선정, 활용하는 것이 중요하다.

IV. 결 론

노출 평가과정에서 모델링 방법은 노출 측정이 어려울 때 쉽고 빠르게 목적에 맞는 결과를 도출할 수 있으나 최종 결과 값의 정확도나 불확실성에 대한 검증이 필요하다. 모델의 신뢰성에 결정적인 미치는 요인은 노출 추정을 위한 시나리오와 모델을 구성하는 여러 변수들이다. 본 연구에서는 일부 흡입 노출 모델을 선정하여 각 모델에 적용되는 알고리즘 수식과 노출 추정에 필요한 입력 변수 정보들을 검토하였다. 노출 추정을 위한 알고리즘 수식은 기본적으로 대상 유해 물질에 대한 물리화학적 특성과 노출 특성, 환경 변수간의 함수로 구성되며, 이 구성 요소들의 하위 범주에는 다양한 입력 변수가 존재한다. 따라서 사용자 측면에서는 모델 알고리즘과 복잡한 입력 변수들의 특성을 면밀히 검토하여 목적에 맞는 모델을 선정하는 것이 중요하다. 향후에는 현재까지 축적된 방대한 노출 자료들을 노출 모델 도구 개발에 적극 활용하는 방안이 모색되어야 하며, 특히 산업보건분야에서는 우리나라 직업병 역학조사 또는 과거 사업장에서의 노출을 추정하거나 직접 노출 평가가 어려운 사업장에 적용 가능한 새로운 직업 노출(환경 노출을 포함) 평가 모델 도구의 개발도 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R1A6A3A03033990).

References

- BAuA (German Federal Institute for Occupational Safety and Health). SprayExpo: modelling exposure during spray applications—Predicting levels of inhalation and dermal exposure to aerosols with spray applications. 2019. Available from: <https://www.baua.de/EN/Topics/Work-design/Hazardous-substances/Assessment-unit-biocides/Sprayexpo.html> (last accessed on 25 July 2019)
- Bekker C, Brouwer DH, van Duuren-Stuurman B, Tuinman IL, Tromp P, et al. Airborne manufactured nano-objects released from commercially available spray products: temporal and spatial influences. *J Expo Sci Env Epid* 2014;24(1):74–81
- Delmaar J, Bokkers B, ter Burg W, Van Engelen JGM. First tier modeling of consumer dermal exposure to substances in consumer articles under REACH: A quantitative evaluation of the ECETOC TRA for consumers tool. *Regul Toxicol Pharm* 2013;65(1):79–86
- ECETOC(European Centre for Ecotoxicology and Toxicology Chemicals). Targeted risk assessment user guide for the integrated tool TRAM version 3 update to version 3.1. Brussels: Belgium; 2014. p. 1–34
- ECHA(European Chemicals Agency). Guidance on information requirements and chemical safety assessment – Part E: Risk characterization. European Chemicals Agency, Helsinki: Finland; 2008. p. 1–75
- Eickmann U, Eickmann J, Tischer M. Exposure to sprays—comparison of the available exposure models. *Gefahrst Reinhalt L* 2007;67(7–8):305–318
- Huang L, Ernststoff A, Fantke P, Csiszar SA, Jolliet O. A review of models for near-field exposure pathways of chemicals in consumer products. *Sci Total Environ* 2017;574:1182–1208
- Lorenz C, Hagendorfer H, von Goetz N, Kaegi R, Gehrig R, et al. Nanosized aerosols from consumer sprays: experimental analysis and exposure modeling for four commercial products. *J Nanopart Res* 2011;13(8):3377–3391
- Losert S, von Goetz N, Bekker C, Fransman W, Wijnhoven

- SW, et al. Human Exposure to Conventional and Nanoparticle-Containing Sprays-A Critical Review. *Environ Sci Technol* 2014;48(10):5366-5578
- Mc Donnell PE, Schinkel JM, Coggins MA, Fransman W, Kromhout H, et al. Validation of the inhalable dust algorithm of the Advanced REACH Tool using a dataset from the pharmaceutical industry. *J Environ Monitor* 2011;13(6):1597-1606
- Nickmilder M, Carbone S, Bernard A. House cleaning with chlorine bleach and the risks of allergic and respiratory diseases in children. *Pediatr Allergy Immu* 2007;18(1):27-35
- NIER(National Institute of Environmental Research). Manual of occupational and consumer exposure model (ECETOC TRA) for implementation under Korea REACH regulation. Report No. NIER-GP2016-047. Incheon: Republic of Korea; 2016. p. 1-63
- NIER(National Institute of Environmental Research). Notification No. 2018-70: Regulation on the subjects, methodology and etc. of consumer household products risk assessment - Article No. 9. Exposure assessment. 2018
- Park JY, Lim M, Yang W, Lee K. Exposure factors for cleaning, automotive care, and surface protection products for exposure assessments. *Food Chem Toxicol* 2017a;99:128-134
- Park J, Ham S, Jang M, Lee J, Kim S, et al. Spatial-temporal dispersion of aerosolized nanoparticles during the use of consumer spray products and estimates of inhalation exposure. *Environ Sci Technol* 2017b;51(13):7624-7638
- Park J, Yoon C, Lee K. Comparison of modeled estimates of inhalation exposure to aerosols during use of consumer spray products. *Int J Hyg Env Heal* 2018;221(6):941-950
- Riedmann R, Gasic B, Vernez D. Sensitivity analysis, dominant factors, and robustness of the ECETOC TRA v3, Stoffenmanager 4.5, and ART 1.5 occupational exposure models. *Risk Anal* 2015; 35(2):211-225
- RIVM(National Institute for Public Health and the Environment in Netherlands). ConExpo 4.0: Consumer Exposure and Uptake Models Program Manual. RIVM Report 320104004/2005. Bilthoven: The Netherlands; 2005. p. 1-72
- RIVM(National Institute for Public Health and the Environment in Netherlands). The ConsExpo spray model - Modelling and experimental validation of the inhalation exposure of consumers to aerosols from spray cans and trigger sprays. RIVM Report 320104005. Bilthoven: The Netherlands; 2009. p.1-70
- RIVM(National Institute for Public Health and the Environment in Netherlands). Comparing the BAMA indoor air and ConsExpo inhalation models. RIVM Letter Report 320104009/2010. Bilthoven: The Netherlands; 2010. p. 1-22
- Steiling W, Bascompta M, Carthew P, Catalano G, Corea N, et al. Principle considerations for the risk assessment of sprayed consumer products. *Toxicol Lett* 2014;227(1):41-49
- USEPA(United States Environmental Protection Agency). Consumer Exposure Model user guide: Prepared for EPA Office of Pollution Prevention and Toxics by ICF International under EPA. Contract No. EP-W-12-010. Washington DC: United States; 2012. p. 1-96
- WHO(World Health Organization). Principles of characterizing and applying human exposure models. Harmonization Project Document No.3. Geneva: Switzerland;2005. p. 1-70

<저자정보>

박지훈(박사후연구원), 윤충식(교수)