한국환경보건학회지, 제44권 제5호(2018)
J Environ Health Sci. 2018; 44(5): 460-467
원 저 Original articles

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2018.44.5.460

노출 모델의 화평법 적용성: ECETOC TRA와 Stoffenmanager Tier 1 노출 모델을 활용한 벤젠의 작업자 노출 평가

문준식* · 옥정원** · 정욱현* · 나진성***† · 김기태*†
*서울과학기술대학교 환경공학과, **가천대학교 의과대학 예방의학교실,
***한국생산기술연구원 환경규제기술센터

Occupational Exposure Assessment for Benzene Using Exposure Models (ECETOC TRA and Stoffenmanager) and Applicability Evaluation of Exposure Models in K-REACH

Joonsik Moon*, Jeongwon Ock, Uk-Hyun Jung *, Jin-Sung Ra***†, and Ki-Tae Kim*†**
**Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology*
***Department of Preventive Medicine, Gachon University College of Medicine*
****Eco-testing & Risk Assessment Center, Korea Institute of Industrial Technology*

ABSTRACT

Objectives: The objectives of this study are to estimate the inhalation exposure level of benzene for workers using Tier 1 exposure models ECETOC TRA (European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Target Risk Assessment) and Stoffenmanager, and to investigate their reliability for exposure assessment in K-REACH.

Methods: Two exposure scenarios, 'manufacture of benzene' and 'use as solvents,' were developed for assessment of workers' exposure to benzene. The Process Category (PROC) for ECETOC TRA was collected from the European Chemical Agency (ECHA) registration dossier, and the Activity for Stoffenmanager was converted from PROC using translation of exposure models (TREXMO). The information related to exposure, such as working duration, Respiratory Protective Equipment (RPE), Local Exhaust Ventilation (LEV), and Risk Management Measure (RMM) were classified into high, medium, and low exposure conditions. The risk was determined by the ratio of the estimated exposure and occupational exposure limits of benzene.

Results: Under high exposure conditions, the worker exposure level calculated from all PROCs and Activities exceeded the risk level, with the exception of PROC 1 and Activity 1. In the medium exposure condition, PROC 8a, 8b, and 9 and Activity 3, 7, and 8 all exceeded the risk, whereas in the low condition, all PROCs and Activities were determined to be safe. As a result, action corresponding with the low exposure condition is required to reduce the risk of exposure among workers in workplaces where benzene is manufactured or used as a solvent. In addition, the predicted exposure levels derived from the exposure models were lower than measured levels. The exposure levels estimated from Stoffenmanager were more conservative than those from ECETOC TRA.

Conclusions: This study demonstrates the feasibility of exposure models for exposure assessment through the example of occupational inhalation exposure assessment for benzene. For more active utilization of exposure

†Co-Corresponding author

†Corresponding author: Ki-Tae Kim, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Tel: +82-2-970-6642, Fax: +82-2-970-5776, E-mail: ktkim@seoultech.ac.kr
Received: 02 October 2018, Revised: 10 October 2018, Accepted: 14 October 2018

models in K-REACH, the exact application of collected information and accurate interpretation of obtained results are necessary.

Keywords: occupational exposure assessment, exposure model, ECETOC TRA, Stoffenmanager, benzene, K-REACH

I. 서 론

화학물질을 다루는 대부분의 사업장에서는 유해화학물질을 취급하고 있으며 이러한 유해화학물질은 제조, 생산, 사용, 폐기 등 다양한 과정에서 유출되어 인체 및 환경에 악영향을 유발하고 있다. 벤젠은 대표적인 유해화학물질로써 국내 연간 제조량과 수입량이 각각 8,755,521톤, 450,885톤에 이르는 주요 관리대상 물질 중에 하나이다.[1] 산업적으로 벤젠은 다양한 화학용품을 만들기 위한 용매로 사용되며 가솔린 첨가제, 인쇄, 드라이클리닝 등에도 포함되는 것으로 보고된다.[2] 이러한 사업장에서 벤젠을 다루는 작업자는 벤젠에 급성 및 만성적으로 노출되어 암 발생, 폐질환 등의 나쁜 건강 영향이 나타날 수 있다. 따라서 벤젠을 취급하는 사업장에서는 작업자 노출 평가를 통해 벤젠의 노출량이 위해 수준 이하로 관리되는 지를 지속적으로 확인하고, 안전하게 작업을 수행할 수 있는 작업 환경을 조성해야 한다.

화학물질에 대한 노출 평가는 화학물질이 식이, 호흡, 피부접촉 등 대상 노출경로에 따라 환경 매체나, 일반인(소비자), 작업자 등의 사람과 같은 노출 대상에 얼마나 존재하는지 그 노출량의 추정을 목표로 수행하며, 노출량을 평가함에 있어서는 노출량을 직접 측정하거나 노출 모델을 사용하여 노출량을 예측하는 방법이 사용된다.[3] 작업자 노출 평가에서 노출량을 실측하는 방법은 정확하고 개별적인 작업자 노출량을 추정할 수 있지만, 시간이 오래 걸리고 많은 인력이 필요하며 상당한 비용을 지불해야 한다. 반면 노출 모델을 사용하는 방법은 대상 화학물질의 기본 정보 및 노출에 관한 일부 정보로 노출량을 추정할 수 있어, 상대적으로 짧은 기간에 비용 효율적으로 다수의 노출 평가가 가능하다. 이러한 장점으로 노출 평가에서의 노출 모델을 사용하는 방법은 유럽 REACH (Regulation, Evaluation, Authorization and Chemicals), 우리나라 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률(이하 화평법)과 같은 화학물질 등록 제도에서 활발하게 사용되고 있으며, 대상 화학물질의 수 증가에 따라 그 활용성이 점점 확대되는 추세이다. 화학물질 등록 제도에서는 등록자가 화학물질의 전생애단계에 걸친 노출 평가를 실시하는데, 이 과정에서 등록자는 노출 모델을 사용하여 다수의 노출 평가를 수행한다.[4] REACH가 시행된 유럽에서는 2008년부터 현재까지 다양한 노출 모델을 개발하여 사용 중에 있다. 유럽에서 개발된 노출 모델 중 대표적인 작업자 노출 모델로는 ECETOC TRA (European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment), EMKG (Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe)-Expo-Tool, Stoffenmanager, ART (Advanced REACH Tool), RISKOFDERM, BEAT (Bayesian Exposure Assessment Tool), MEASE (Metal's Estimation and Assessment of Substance Exposure) 등이 있다. 이러한 노출 모델은 Tier 1 노출 모델과 Tier 2 노출 모델로 구분되는데 Tier 1 노출 모델은 간단한 입력 정보로 보수적인 노출량을 예측하며 Tier 2 노출 모델은 구체적인 정보로 사실적인 노출량을 예측하는 것으로 알려져 있다. ECETOC TRA, MEASE의 경우 화학물질에 대한 작업자 흡입 및 피부 경로의 노출량 예측이 가능한 Tier 1 모델이며 EMKG-Expo-Tool, Stoffenmanager는 Tier 1, ART는 Tier 2로 흡입 노출량 예측 모델, BEAT는 Tier 1, RISKOFDERM은 Tier 2로 피부 노출량 예측 모델이다.[5] 우리나라 화평법에서는 작업자 노출 평가에서 유럽의 Tier 1 노출 모델 ECETOC TRA를 사용하도록 권고하고 있다.[6]

노출 모델에 관한 연구는 유럽의 등록제도인 REACH와 관련하여 유럽을 중심으로 활발하게 진행되었다. 그러나 REACH와 유사한 화학물질 등록제도인 화평법을 시행하는 우리나라에서는 노출 모델을 활용한 노출 평가에 대한 연구 보고가 적다. 이에 따라 본 연구에서는 노출 모델을 사용하여 벤젠의 작업자 노출 평가를 수행하고 화평법 제도 아래 노출 모델

의 적용성을 평가하고자 하였다. 벤젠의 노출 평가는'벤젠을 제조'하거나 '용매로 사용'하는 작업자(노출 시나리오)를 대상으로 하였으며, 작업자 노출량을 추정하고 위해도를 확인하였다. 벤젠의 인체 노출 경로 특징에 따라 흡입 노출을 주요 경로로 가정하였고, 작업자 흡입 노출량 예측이 가능한 Tier 1 노출 모델인 ECETOC TRA와 Stoffenmanager을 노출 평가에 활용하였다.[7]

II. 재료 및 방법

1. ECETOC TRA의 작업자 노출량 예측

ECETOC TRA 모델 구동에서 물리화학적 특성 정보는 물질의 상태, 분자량, 증기압, 용해도, 물-옥탄올 분배계수, 생분해성 결과가 세부항목으로 요구되며, 노출 정보는 공정 범주(Process Category, PROC), 사용 유형(산업적 사용/전문적 사용), 작업 공간(실내/실외 작업) 및 환기 시설 정보(일반환기시설/국소배기장치), 흡입 보호구 사용 여부 및 효율, 혼합물 여부 및 함량, 작업 시간 등이 세부항목으로 요구된다.[8]

벤젠의 물리화학적 특성 정보는 ECHA (European CHemical Agency)의 자료를 수집하여 적용하였다. 노출 정보의 경우 사용 유형은 '산업적 사용', 혼합물 여부는 '혼합물 아님'을 적용하였으며 PROC은 ECHA의 등록 자료를 활용하여'벤젠 제조'에 PROC 1, 2, 3, 4, 8a, 8b, 15, '용매로 사용'에 PROC 1, 2, 3, 4, 8a, 8b, 9, 15를 적용하였다.[9] PROC은 전체 노출 시나리오에서의 세부적인 시나리오를 나타내며 PROC 1는 밀폐된 연속공정, PROC 2는 간헐적인 노출이 있는 연속 공정, PROC 3은 밀폐된 회분 또는 합성 공정, PROC 4는 간헐적인 노출이 있는 회분 또는 합성 공정을 나타낸다. PROC 8a, 8b는 비고정형(8a) 또는 고정형(8b) 저장 시설에서의 운반 공정, PROC 9는 지정된 주입 라인에서 소형 용기에 주입하는 공정을 나타낸다.[10] PROC 이외의 노출 정보(작업 공간, 환기 시설, 보호구, 작업 시간)는 실제 사업장에서의 다양성을 고려하여 노출 조건에 따라 단계별로 적용하였으며 노출량이 높은 작업 환경 조건(High exposure condition, H), 중간 노출 조건(Medium exposure condition, M), 낮은 노출 조건(Low exposure condition, L)으로 구분하였다. 노출량이 높은 작업 환경 조건(H)은 worst case의 사업장을 가정하였으며 ECETOC TRA에서 국소배기장치가 없는 실내 작업, 흡입 보호구 없음, 작업 시간 4시간 이상을 적용하였다. 노출량이 높은 환경(H)에 적용된 인자들은 ECETOC TRA에서의 Default 인자로써 그 결과는 각 공정에서의 최대 노출량을 의미한다. 반면 낮은 노출 조건(L)은 노출이 최소화된 사업장을 가정하였으며 강화된 국소배기장치 및 일반환기시설이 있는 실내 작업, 흡입 보호구 95% 착용, 작업 시간 1-4시간을 적용하였으며 그 결과는 최소 노출량에 해당된다. 중간 노출 조건(M)은 H와 L의 중간 수준의 사업장이며 일반 환기 시설이 있는 실내 작업, 흡입 보호구 90% 착용, 작업 시간 1-4시간을 적용하였다(Table 1).

2. Stoffenmanager의 작업자 노출량 예측

Stoffenmanager의 구동에 필요한 물질 정보 및 노출 정보를 수집하였으며 물질 정보로 물질명, CAS 번호, 물질의 상태, 분자량, 증기압에 대해서는 ECETOC TRA와 동일한 자료를 사용하였다. 노출 정보의 경우 공정 정보, 작업 시간, 작업 빈도, 함량, 노출 거리, 보호구 정보 및 효율, 작업장 크기, 청소 상태, 환기 시설 정보, 노출 제어 시설 정보 등을 수집하였고, 공정 정보, 함량, 노출거리를 제외한 항목은 노출 환경을 가정하여 단계적으로 적용하였다.[11]

Stoffenmanager에서는 ECETOC TRA에서의 PROC과 유사한 의미로 Activity라는 기술어를 사용한다. 본 연구에서는 TRanslation of EXposure MOdel (TREXMO) 프로그램을 사용하여 ECETOC TRA에

Table 1. Input data for ECETOC TRA

Exposure condition	Type of Setting	Concentration	Duration (h)	Ventilation	Respiratory Protective Equipment (RPE)
High	Industrial	100% (No mixture)	>4	Indoor (No ventilation)	No RPE
Medium			1-4	Indoor with good General ventilation	90% RPE
Low			1-4	Indoor with enhanced General ventilation and LEV	95% RPE

서 사용된 PROC를 Stoffenmanager의 Activity로 변경하여 적용하였으며 Activity 순서에 따라 밀폐된 공정'에서부터 '연기가 발생하는 고압 공정'까지를 ACT 1~ACT 8로 나타내었다.[12] 예를 들어 ECETOC TRA에서 PROC 1을 선택한 경우 이를 TREXMO 프로그램으로 변경된 ACT 1을 Stoffenmanager에 적용하였다. 변경된 결과에 따라 '벤젠의 제조', '용매로 사용' 시나리오에서 동일한 4개의 ACT 1, 3, 5, 7이 해당되었으며 ACT 1은 완전 밀폐된 공정, ACT 3은 화학물질이 미량 유출되는 공정, ACT 5은 저속, 저압 공정, ACT 7은 연기가 발생하지 않는 고속, 저압 공정을 나타낸다. 공정 정보 이외의 벤젠의 함량은 100%, 노출 거리는 1 m 이상을 적용하였으며 그 외 노출 정보는 ECETOC TRA와 마찬가지로 노출 환경에 따라 노출량이 높은 작업 환경(H), 중간 노출 조건(M), 낮은 노출 조건(L)으로 구분하였다. 노출량이 높은 작업 환경(H)는 Stoffenmanager에서 적용 가능한 worst case로써 작업 시간 480분, 작업 빈도 4~5일/주, 보호구 없음, 청소 상태 나쁨, 작업장 100 m^3 미만, 환기시설 없음, 노출 제어 시설 없음 등이 적용되며 결과적으로 각 공정에서의 Stoffenmanager의 최대 노출량을 나타낸다. 낮은 노출 조건(L)은 노출을 최소한 작업장을 가정하여 작업 시간 120분, 작업 빈도 2~3회/주, 흡입 보호구 40 APF (Assignment Protection Factor), 청소 상태 양호, 작업장 1000 m^3 이상, 강화된 환기 상태(환기장치 가동), 국소배기장치 및 노출원과의 접촉 차단 시설 운용 등을 적용되며 최소 노출량에 해당된다. 중간 노출 조건(M)은 H와 L의 중간 단계로 작업 시간 240분, 작업 빈도 4~5일/주, 흡입 보호구 10 APF, 청소 상태 양호, 작업장 100-1000 m^3, 일반적인 환기 상태(문/창문 등을 통한 환기 상태), 국소배기장치를 통한 노출 저감 시설 운용 등을 적용하였다 (Table 2).

3. 벤젠의 작업자 위해도 결정

2가지 노출 모델을 통해 예측된 작업자 노출량의 위해도를 결정하기 위해 노출량과 작업자 노출 기준(Occupational Exposure Level, OEL)을 비교하여 위해도를 평가하였다. 위해도가 1 미만일 경우 안전, 1 이상의 경우 위해가 있다고 판단하였다. 벤젠의 작업자 노출 기준은 산업안전보건법(이하 산안법)의 작업자 노출한계 수준 0.5 ppm, 유럽 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)의 OEL 0.1 ppm, 미국 OSHA의 PEL (Permissible Exposure Level) 1 ppm, ACGIH (Association Advancing Occupational and Environmental Health)의 TLV (Threshold Limit Value) 0.5 ppm, NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)의 REL (Recommended Exposure Limit) 0.1

Table 2. Input data for Stoffenmanager

Exposure condition	Concentration	Working Distance	Duration (min)	Frequency (day/week)	Volume of the working room (m^3)	Working room cleaning and maintenance/inspections	Ventilation	Respiratory Protective Equipment (RPE)	Available Control Measures
High	100% (No mixture)	>1 m	480	4-5	<100	No daily cleaning and maintenance/inspections	Indoor (No ventilation)	No RPE	No
Medium			240	4-5	100-1000	Daily cleaning and maintenance/inspections	General ventilation (door and window)	10 APF RPE	LEV
Low			120	2-3	>1000	Daily cleaning and maintenance/inspections	General ventilation (mechanical)	40 APF RPE	Containment of the source with LEV

ppm 등이 확인되었으며, 산안법에 따른 벤젠의 작업자 노출 기준인 0.5 ppm (3 mg/m^3)을 위해도 계산에 사용하였다.[13),14)]

III. 결과 및 고찰

1. 벤젠의 작업자 흡입 노출량 및 위해도-ECETOC TRA

ECETOC TRA 노출 모델을 사용하여 8개의 PROC을 3단계의 노출 환경에 따라 구분하여 작업자의 흡입 노출량과 위해도를 산출하였다(Table 3). 노출량이 높은 조건 H에서는 PROC 1을 제외한 PROC 2, 3, 4, 8a, 8b, 9, 15의 노출량이 위해도 1을 초과하며 노출 조건 M에서는 일부 공정(PROC 1, 2, 3, 4, 15)에서의 노출량은 위해 수준이 아니지만 이송 공정, 주입 공정(PROC 8a, 8b, 9)에서의 노출량은 위해한 수준인 것으로 나타났다. 노출 조건 L에서는 모든 PROC에서의 노출량은 위해도 1 미만으로 평가되었다. ECETOC TRA의 노출 평가 결과는 벤젠을 제조하거나 용매로 사용하는 작업자는 작업시간 1-4시간, 환기 상태 양호, 강화된 국소배기장치 가동, 95% 효율의 흡입 보호구 착용의 작업 조건 또는 이와 유사한 수준의 작업 조건에서 벤젠 흡입 노출로부터 안전하다고 해석할 수 있다. 벤젠의 용도에 따라 제조되거나 용매로 사용될 때의 차이는 PROC 9의 포함여부에서 차이가 발생하나 PROC 8a와 PROC 9가 노출량 및 위해도에서 같은 수치를 나타내므로 두 용도 간의 차이는 거의 없을 것으로 판단된다.

Table 3. Exposure estimate and risk characterization in ECETOC TRA

Process Category (PROC)	Exposure condition	Exposure estimate	Risk characterization
PROC 1	High	3.25E-02	1.08E-02
	Medium	1.37E-03	4.56E-04
	Low	2.93E-04	9.77E-05
PROC 2	High	1.63E+01	5.43E+00
	Medium	6.83E-01	2.28E-01
	Low	1.46E-02	4.87E-03
PROC 3	High	3.25E+01	1.08E+01
	Medium	1.37E+00	4.56E-01
	Low	2.93E-02	9.77E-03
PROC 4	High	6.51E+01	2.17E+01
	Medium	2.73E+00	9.11E-01
	Low	5.86E-02	1.95E-02
PROC 8a	High	1.63E+02	5.43E+01
	Medium	6.83E+00	2.28E+00
	Low	1.46E-01	4.87E-02
PROC 8b	High	8.14E+01	2.71E+01
	Medium	3.42E+00	1.14E+00
	Low	3.66E-02	1.22E-02
PROC 15	High	3.25E+01	1.08E+01
	Medium	1.37E+00	4.56E-01
	Low	2.93E-02	9.77E-03
PROC 9	High	1.63E+02	5.43E+01
	Medium	6.83E+00	2.28E+00
	Low	1.46E-01	4.87E-02

2. 벤젠의 작업자 흡입 노출량 및 위해도-Stoffenmanager

ECETOC TRA의 PROC을 TREXMO 프로그램을 통해 변환한 결과, (PROC 1), (PROC 2, 3, 15) (PROC 4, 9), (PROC 8a, 8b)가 각각 ACT 1, ACT 3, ACT 5, ACT 7로 변환되었으며 이에 따라 Stoffenmanager에서의 작업자 흡입 노출량 및 위해도를 산출하였다(Table 4). 노출량이 높은 조건 H에서는 ACT 1, 3, 5, 7에서의 작업자 노출량이 모두 위해도 1 이상으로 나타났으며, 노출 조건 M에서도 ACT 1을 제외한 나머지 ACT 3, 5, 7에서의 노출

Table 4. Exposure estimate and risk characterization in Stoffenmanager

Activity	Exposure condition	Exposure estimate	Risk characterization
ACT 1	High	1.59E+02	5.30E+01
	Medium	0	0
	Low	0	0
ACT 3	High	1.04E+03	3.47E+02
	Medium	8.42E+00	2.81E+00
	Low	1.00E-01	3.33E-02
ACT 5	High	3.48E+03	1.16E+03
	Medium	2.86E+01	9.53E+00
	Low	3.50E-01	1.17E-01
ACT 7	High	6.23E+03	2.08E+03
	Medium	5.12E+01	1.71E+01
	Low	6.20E-01	2.07E-01

량이 위해 수준으로 나타났다. 노출 조건 L에서는 ACT 1, 3, 5, 7의 노출량이 모두 위해 수준 이하로 평가되었다. Stoffenmanager의 결과는 벤젠을 제조하거나 용매로 사용하는 작업자가 작업 시간 2시간, 작업 빈도 2-3일/주, 작업장 크기 1000 m^3 이상, 청소 상태 양호, 40 APF 이상의 흡입 보호구 착용, 국소 배기장치 가동, 노출원과의 접촉 차단 시설 운용의 작업 조건 또는 이와 유사한 수준의 작업 조건에서 벤젠 흡입 노출로부터 안전한 것으로 해석할 수 있다. 벤젠을 제조하거나 용매로 사용할 때 동일한 Activity가 적용되므로 두 용도 간의 작업자 노출량 차이는 없다고 판단된다.

3. 모델 예측 결과 분석

노출 모델의 결과 분석을 위해 각 노출 모델로부터 예측된 노출량을 비교하고, 문헌에서의 실측 값과 비교하였다. 각 노출 모델의 노출량 비교는 노출 조건에 따라 해당 공정을 구분하여 수행하였다(Fig. 1). 노출 조건 H에서는 노출이 높을 것으로 예상되는 worst case의 작업장 환경을, L에서는 노출을 최소화할 수 있는 작업장 환경을, 노출 조건 M에서는 H와 L의 중간 수준으로 노출이 되는 작업장 환경조건을 가정하였고, 동일하거나 유사한 노출 수준에 해당되는 두 모델의 공정을 구분한 것이다. 노출량 비교 결과, PROC 1과 ACT 1를 제외한 모든 공정에서 Stoffenmanager가 ECETOC TRA보다 모든 노출 조건(H, M, L)에서 노출량을 높게 예측하였다. 예외적으로 PROC 1과 ACT 1에 대해서, 노출 조건 노출 조건 M, L에서 ECETOC TRA가 Stoffenmanager보다 보수적으로 높은 노출량을 예측하였다. PROC 1과 ACT 1을 제외한 다른 공정에서의 노출량의 차이는 Stoffenmanager가 ECETOC TRA보다 H에서 가장 크게 보수적이었으며 노출 조건이 강화되는 M, L의 순으로 줄어들었다. 결과적으로 Stoffenmanager는 ECETOC TRA보다 PROC 1, ACT 1의 일부 작업 환경에서 다른 경향을 나타내지만 대부분의 공정에서 모든 작업 환경에 대해 보수적인 작업자 노출량을 예측하고 그 차이는 노출 조건 H (최대 노출량)에서 가장 큰 것으로 나타났다.

벤젠의 작업자 실측 값으로 본 연구에서와 동일한 시나리오에 대한 실측 자료로써 EU RAR (Risk Assessment Report)의 벤젠 제조 작업자를 대상으로

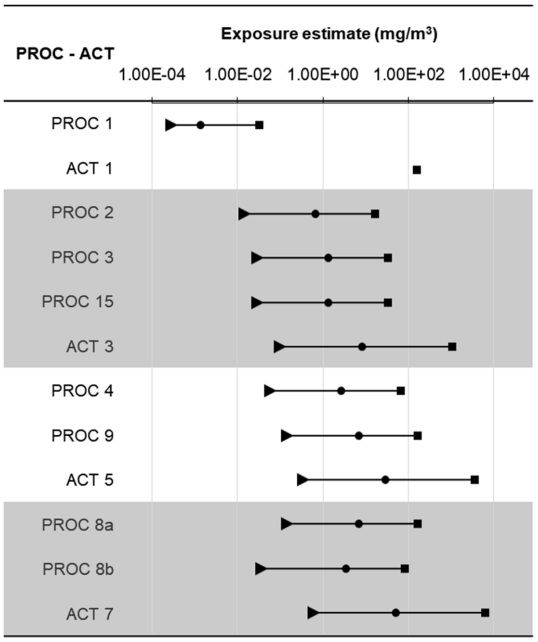

Fig. 1. Difference between ECETOC TRA and Stoffenmanager with changing working condition (▶: Low, ●: Medium, ■: High)

측정된 흡입 노출량 0.002-16 mg/m^3을 확인하였다.[15] 모델로부터 예측된 노출량은 ECETOC TRA에서 벤젠 제조 시나리오에 포함된 PROC 1, 2, 3, 4, 8a, 8b, 15에 대해 노출 조건에 따라 0.000293 (PROC 1-L)-163 (PROC 8a-H) mg/m^3 으로 나타났으며, Stoffenmanager 경우에는 ACT 1, 3, 5, 7에 대해 노출 조건에 따라 0 (ACT 1-L)-6230 (ACT 8-H) mg/m^3으로 나타났다. 결과적으로 두 노출 모델로부터 예측된 노출량은 실측 자료보다 최대값에서 10~400배 보수적인 값을 보였으나 최소값에서 노출 모델의 예측 값이 실측 값보다 낮은 것으로 나타났다. 노출 모델에서 최소값은 PROC 1과 ACT 1에서의 노출량으로, PROC 1과 ACT 1에서의 노출량은 실제 노출량 보다 보수적이지 않은 것으로 보여지나 RAR에서의 실측 값에 대한 구체적인 시나리오를 확인할 수 없으므로 직접적인 비교는 제한적일 수 있다. PROC 1과 ACT 1을 제외한 나머지 공정에서는 최소값이 실측 자료보다 보수적으로 나타나며, 노출 모델의 예측 값과 실측 값을 비교한 다른 연구들에서는 노출 모델의 예측 값이 실측 값보다 보수적이라는 결과가 공통적으로 확인된다.[16,17,18] 따라서 일반

적으로 노출 모델에서의 노출량은 실제 작업자 노출량보다 보수적인 것으로 판단되나 완전 밀폐된 공정을 나타내는 PROC 1과 ACT 1에서의 추가적인 검증이 필요할 것이다.

4. 노출 모델의 화평법 적용성 평가

Tier 1 작업자 노출 모델인 ECETOC TRA, Stoffenmanager의 벤젠의 노출 평가 결과는 대부분의 상황에서 실제 노출량에 비해 보수적인 노출량을 나타낸다. 그러나 Stoffenmanager에서 예측된 노출량은 ECETOC TRA와 비교할 때, 모델 구동에서 요구되는 입력 정보에 비해 매우 보수적인 값을 나타낸다. 작업 환경에서 ECETOC TRA는 환기시설, 작업 시간, 흡입 보호구 착용 여부 및 효율 등이 입력 정보로 요구하며 Stoffenmanager는 이를 포함한 작업 빈도, 작업 거리, 작업장 크기, 노출 저감 시설, 청소 상태가 추가적으로 요구한다. 그러나 결과적으로 Stoffenmanager는 ECETOC TRA보다 대부분의 공정과 작업 환경에서 보수적인 노출량을 나타낸다. 제도적으로 과하게 보수적인 노출량은 위해도 1을 초과하기 쉬우며, 결과적으로 등록자의 화학 물질 등록에 지장을 줄 수 있다. 따라서 Tier 1 노출 모델은 간단한 입력정보로 적당한 보수성을 나타내는 것이 등록자들에게 효과적이며, 비교적 간단한 입력 정보만으로 적당히 보수적인 노출 평가를 수행할 수 있는 ECETOC TRA가 Stoffenmanager보다 등록제도에서 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 그러나 벤젠과 증기압, 분자량 등 물리화학적 특성이 다른 물질의 노출 평가 결과는 그 결과가 다를 수 있으므로 특성이 다른 다양한 물질을 대상으로 ECETOC TRA와 Stoffenmanager 모델로부터 추정된 노출량 비교 연구가 추가적으로 필요할 것이다.

Tier 1 노출 모델을 활용한 노출 평가는 다수의 시나리오에 대한 노출량을 확인할 수 있으며 정확하진 않으나 충분히 보수적인 노출량을 나타낸다는 점에서 화평법과 같은 화학물질 등록 제도에서 요구하는 노출평가 결과로 활용하는데 효과적이라 할 수 있다. 그러나 완전 밀폐된 공정을 나타내는 ECETOC TRA의 PROC 1과 Stoffenmanager의 ACT 1에서의 노출량에 대한 추가적인 검증이 필요하므로 사용자는 완전 밀폐된 공정에 대한 확실한 근거를 갖고 노출 모델에 적용해야 한다. 또한 노출 모델에 적용되는 입력 정보(공정, 노출 정보)에 따라 결과에서 매우 큰 차이를 나타내기 때문에 실제 작업 환경과 일치하도록 노출 모델에 적용하는 것도 중요하다. 따라서 화학물질 제도에서의 등록자(노출 모델 사용자)는 노출 모델에 대한 충분한 이해를 기반으로 노출 모델에 적합한 정보를 수집하여 노출 평가를 수행해야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 노출 모델을 사용하여 벤젠 작업자 흡입 노출 평가를 수행하고 화평법에서의 적용성을 평가하였다. 벤젠의 작업자 흡입 노출 평가는 Tier 1 노출 모델인 ECETOC TRA와 Stoffenmanager를 사용하였으며 세부 공정과 작업 환경에 따라 노출량과 위해도를 산출하였다. 노출 모델의 결과는 측정값과 비교해서 대부분 공정에서 보수적인 특성을 나타내었지만 ECETOC TRA의 PROC 1과 Stoffenmanager의 ACT 1에서 보수성을 검증하기 위한 추가 연구가 필요한 것으로 나타났다. Stoffenmanager 노출 모델은 요구되는 입력 정보에 비해 과하게 보수적인 노출량이 확인되어 화평법과 같은 화학물질 등록 제도에서 ECETOC TRA 노출 모델의 활용이 등록자들에게 더 효과적일 것으로 판단된다. 또한 노출 모델의 결과는 입력 정보에 따라 큰 결과의 차이를 초래할 수 있으므로 사용자는 정확한 정보 수집을 통한 노출 모델 사용이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Korea ministry of environment. Report on the results of domestic chemical substance distribution survey; 2017. p. 1-11.
2. Ministry of Food and Drug Safety. Tox-info benzene. http://www.nifds.go.kr/toxinfo. [accessed 19 January 2018].
3. National institute of environmental research. Guidance for make chemical safety report. 2nd edition; 2017. p. 193-197.

4. Korea ministry of government legislation. Act on registration, evaluation, etc. of chemical. http://law.go.kr. [accessed 23 January 2018].
5. European chemicals agency. Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.14: Occupational exposure assessment; 2016. p. 48-70.
6. National institute of environmental research. Guidance for make chemical safety report. 2nd edition; 2017. p. 197-198.
7. Agency for toxic substances and disease registry. Toxicological profile for benzene. 2007. p. 29-30
8. National institute of environmental research. ECETOC TRA manual for K-REACH implementation. 2016. p. 3-4.
9. European chemicals agency. Registration dossier of benzene. https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/16102/3/1/4. [accessed 20 May 2018].
10. European chemicals agency. Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.12: Use description; 2015. p. 49-54.
11. European chemicals agency. Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.14: Occupational exposure assessment; 2016. p. 61-62.
12. Institute for work and health (IST in Switzerland). Translation of exposure models (TREXMO). http://trexmo.chuv.ch. [accessed 10 June 2018].
13. Ministry of Food and Drug Safety. Tox-info benzene. http://www.nifds.go.kr/toxinfo. [accessed 19 January 2018].
14. Korea ministry of government legislation. Occupational safety and health act. http://law.go.kr. [accessed 13 May 2018].
15. European chemicals agency. European Union Risk Assessment Report (RAR). benzene; 2008. p. 119-124.
16. Riedmann RA, 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 Analysis*. 2015; 35(2): 211-225.
17. Spinazze A, Lunghini F, Campagnolo D, Rovelli S, Locatelli M, Cattaneop A et al. Accuracy evaluation three modelling tools for occupational exposure assessment. *Annals of work exposures and health*. 2017; 61(3): 284-298.
18. Kupczewska-Dobecka M, Czerczak S, Jakubowski M. Evaluation of the TRA ECETOC model for inhalation workplace exposure to different organic solvents for selected process categories. *International journal of occupational medicine and environmental health.* 2011; 24(2), 208-217.

저자 정보

문준식(학생), 옥정원(학생), 정욱현(학생),
나진성(수석연구원), 김기태(교수)