

공정 범주에 따른 ECETOC TRA 모델 평가로부터 도출한 한국 작업장 노출 평가 개선 방안

김기은*† · 김종운** · 전현표* · 김상현*** · 정연승****

*KIST Europe 환경안전사업단, **한국화학연구원 화학안전연구센터,
경성대학교 제약공학과, *부산대학교 환경공학과

Enhancement of Occupational Exposure Assessment in Korea through the Evaluation of ECETOC TRA according to PROCs

Ki-Eun Kim*†, Jongwoon Kim**, Hyunpyo Jeon*,
Sanghun Kim***, and Yeonseung Cheong****

**Environmental Safety Group, KIST Europe, Saarbrücken, Germany*

***Chemical Safety Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon, Korea*

****Department of Pharmaceutical Science and Technology, Kyungshung University, Busan, Korea*

*****Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea*

ABSTRACT

Objectives: The objectives of this study are to evaluate the accuracy and precision of exposure model ECETOC TRA v.3.1 by comparing model predictions with repeated exposure measurements in Korean workplaces and to investigate the applicability of ECETOC TRA to Korean workplace exposure assessment in K-REACH.

Methods: Measured values and work conditions for 14 kinds of chemicals collected from exposure field surveys conducted at 10 companies in Korea were utilized for this study. All possible process categories (PROCs) considered to be relevant to each work process classification were selected and applied to ECETOC TRA as major determining parameters. In order to quantify the accuracy of the model, the lack of agreement (bias, relative bias, precision) was calculated and the risk ratios for each exposure situation between estimated and measured were also compared.

Results: The estimated values varied between five and 25 times according to the PROCs for all exposure situations (ESs) based on tasks/chemicals. The results showed that most of the estimated values were below the measured values, and just 13 of 53 tasks were above the measured values. The overall bias and precision were -2.91 ± 1.62 with ECETOC TRA, and we found that ECETOC TRA showed a low level of conservatism when applied to Korean workplaces, similar to previous studies.

Conclusions: This study demonstrates that the existed PROC codes have limitations in fully covering various ESs in Korea. In order to improve the applicability of ECETOC TRA in K-REACH, the addition of new PROCs for Korean industries are necessary.

Keywords: ECETOC TRA, exposure model evaluation, K-REACH, occupational exposure assessment, PROCs

†Corresponding author: Environmental Safety Group, KIST Europe, Saarbrücken, Tel: +49-0-681-9382-322, Fax: +49-0-681-9382-109, E-mail: k.kim@kist-europe.de

Received: 26, March, 2019 Revised: 04, April, 2019 Accepted: 20, April, 2019

I. 서 론

2015년 화학물질의 등록 및 평가등에 관한 법률(이하 화평법)이 시행되면서 연간 10톤 이상 제조·수입대상 물질 및 유해성심사를 통해 위해성 평가가 필요하다고 인정하는 물질에 있어 등록 시 위해성 자료를 함께 제출해야 한다.¹⁾ 화평법 법률 제 14조에 따르면 위해성 자료는 화학물질의 전 과정에서 취급방법과 노출통제·관리방법을 기술한 노출 시나리오를 포함해야 하며 각 노출시나리오별로 환경과 인체건강에 대한 영향과 노출을 평가한 자료를 포함해야 한다.¹⁻³⁾ 즉, 화학물질이 작업자와 환경 매체(대기, 수체, 토양, 저토) 및 소비자에 다양한 경로로 노출되는 정량적인 양을 추정해야 한다.^{2,4)} 정량적인 노출량은 직접 측정하거나 노출 모델을 이용하여 예측할 수 있다. 직접 측정의 경우 시간과 공간의 제약 및 경제적 비용 부담이 큰 반면, 노출 모델을 사용할 경우 상대적으로 빠르고 비용 효율적으로 다양한 물질의 노출 평가 가능하다는 장점을 가지고 있어 제도적으로 적극 활용되고 있다.⁵⁾ 실제로 EU REACH (Regulation, Evaluation, Authorization and Chemicals) 제도하에서 물질 등록시 사용되고 있는 IT Tool인 CHESAR (Chemical Safety Assessment and Reporting tool) 프로그램에는 다양한 노출 평가 모델들(EUSES, ECETOC TRA (Targeted Risk Assessment), ConsEXPO 등)이 탑재되어 활용되고 있다.⁶⁾

화학물질을 제조, 생산하는 사업장내에서의 노출은 작업자의 안전과 환경 매체로의 배출로 이어지기 때문에 화학물질 노출 관리에 있어 첫 출발점이라 할 수 있다.⁷⁾ 그래서 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)은 작업장 노출량을 지속적으로 관리하기 위해 화학물질 안전성 평가 지침서에 간단한 입력 정보만으로도 노출량을 예측하는 Tier 1모델(ECETOC TRA, EKMKG-Expo-Tool)의 활용을 제시하고 있으며 필요시 더 높은 Tier모델(Tier 1.5 모델: Stoffenmanager, Tier 2.0 모델: Advanced REACH Tool: ART)을 사용하도록 권장하고 있다.⁷⁾ EU에서는 이러한 노출 모델들을 제도적으로 활용하기 앞서 모형이 실제 산업 현장의 결과를 잘 반영하고 있는지에 대한 검증 작업을 진행하였다. 그러나 새로운 공정과 물질 개발이 계속적으로 이루어

질 수 밖에 없기 때문에 현재까지도 작업장 노출 평가 모델에 대한 정확도, 신뢰성, conservatism 및 robustness를 평가하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁸⁻¹²⁾ 최근 연구 결과에서는 ECETOC TRA가 유기용매 물질들을 대체적으로 과대 예측한다는 Spinazzè 등의 결과도 있으며⁹⁾ ECETOC TRA가 더 높은 Tier의 모형들에 비해 항상 보수적인 예측력을 보여주지는 않는다는 연구 결과들도 보고되고 있다.^{8,10)} 반대로 일본에서는 일본 작업장내 ethylbenzene의 실측값을 이용하여 ECETOC-TRA 모형이 작업장 흡입 노출량을 대체로 과대 평가 하고 있음을 확인 하였고¹³⁾ 미국 국립 직업안전위생 연구소(NIOSH)에서도 미국 내 18개 작업장에서 측정된 실측값과 Tier 1 모형들과의 평가를 통해 휘발성 물질의 경우 대체로 보수적인 예측력을 나타냄을 확인하였다.¹⁴⁾ 이와 같이 국가 별 작업장 환경 및 공정 조건에 따라 ECETOC TRA 모형의 예측 conservatism이 다른 경향성을 나타내고 있으므로 모형의 활용에 앞서 국가별 작업장 공정조건에 맞게 모형을 평가하는것이 중요하다.

우리나라에서는 2018년 4월 위해성 자료 작성 지원 프로그램(K-CHESAR)에 유럽의 작업장 환경 및 서양인 기준의 입력 변수들을 그대로 적용한 ECETOC TRA를 작업장 노출 평가 모델로 탑재하여 배포하였다. 그러나 ECETOC TRA를 제도적으로 활용하기에 앞서 국내 작업장 실측값을 이용한 모형의 검증 연구가 많이 이루어지지 않았다. 국내 작업장 환경에 따른 ECETOC TRA의 평가 연구는 2012년 한국산업안전보건공단에서 toluene을 비롯한 6가지 화학물질에 대해 모형을 검증한 연구와¹⁵⁾ 2018년 Lee 등의 다양한 세척 공정에서의 10가지 화학물질의 실측값과 ECETOC TRA, Stoffenmanager, ART 모형 예측값과의 비교 연구 결과 밖에 없다.¹⁶⁾ 이중한 등은 일부 공정에서 ECETOC TRA 노출 예측값이 우리나라 작업 환경 측정값에 비해 약 14% 정도 과소 평가하고 있음을 밝혔고¹⁵⁾ Lee 등의 연구 결과에서도 세척 공정에 대해 ART와 Stoffenmanager 모델에 비해 ECETOC TRA가 더 낮은 정확도와 낮은 레벨의 conservatism을 나타내었다.¹⁶⁾ 이는 ECETOC TRA가 국내 작업장 환경에 대한 스크리닝 기능을 제대로 수행하지 못하고 있음을 보여준다. 두 연구만을 가지고 ECETOC TRA가 국내 작업장 실정을 잘 반영하고 있는지 결론내기에는 물질의 수와 평가

된 노출 환경의 수가 제한적이다. 그렇기 때문에 작업장 환경의 노출을 제대로 평가 하기 위해서는 더 많은 국내 작업장 실측값과의 연구가 뒷받침 되어야 한다.

뿐만아니라 ECETOC TRA의 주요 입력변수인 공정 범주(Process Category, PROC) 및 국소배기장치 효율 등이 국내 산업현장의 실정을 제대로 반영 할 수 있는지에 대한 평가와 검증 연구도 계속 진행되어야 할 것이다. 특별히, PROC의 경우 Riedmann 등의 연구에서 밝혀진 바와 같이 ECETOC TRA의 변수 중 가장 민감도가 높은 변수이기 때문에 각 작업장 상황을 잘 반영 할 수 있는 PROC을 적용하는 것이 매우 중요하다.¹⁷⁾ 그러나 우리나라는 작업 공정 범주를 유럽의 분류 기준인, PROC에 맞추어 분

류하지 않기 때문에 실제 ECETOC TRA로 작업장 노출을 평가 할 시 사용자가 PROC선택에 있어 혼란을 겪을 수 있다. 결국 각 작업장의 실제 공정 조건을 제대로 반영하지 않는, 잘못된 PROC의 선택은 작업장 노출량 관리에 혼란을 야기 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 작업 환경 측정 정보를 통해 ECETOC TRA 모델에 적절한 변수를 적용할 수 있는 지를 판단하였다. 그리고 그 변수를 ECETOC TRA에 적용하여 구한 모델의 예측값과 작업 환경 실측값을 비교하여 변수 선택이 실제 모형의 예측력에 어떤 영향을 미치는지를 확인하고자 하였다. 또한 기존 연구에서 평가하지 않은 작업 환경 조건들을 대상으로 모델을 평가 함으로써 ECETOC TRA의 한국 작업장 노출 모델의 적합성을 평가하

Table 1. Information of workplace conditions and input values for ECETOC TRA model estimation

Work place	Process	PROCs	Chemical	Ventilation	Temp (°C)	Types of enterprises
A	Mixing	2,3,4,5,6,19	Toluene, Butanone, Ethyl acetate, Ethyl acrylate, 2-methylpropan-1-ol, N,N-dimethylformamide	LEV	24.5	Industrial
B	Mixing	2,3,4,5,6,19	Toluene, Butanone, Ethyl acetate, Ethyl acrylate, N,N-dimethylformamide	EGV	24.5	Industrial
C	Mixing+ Coating	6,7,10,11,13	Toluene, Butanone, Propan-2-ol	GGV	28	Industrial/ professional (for only PROC 11)
D	Mixing	2,3,4,5,6,19	Toluene, Butanone, Propan-2-ol	GGV	32	Industrial
E	Mixing+ Coating	6,7,10,11,13	Toluene, Butanone, Ethyl acetate, 2-methylpropan-1-ol, Methanol, N,N-dimethylformamide	EGV	25	Industrial / professional (for only PROC 11)
F	Mixing+ Cleaning	2,3,4,5,6,19	Toluene, Butanone, Ethyl acetate, Ethyl acrylate, 2-methylpropan-1-ol, N,N-dimethylformamide	EGV	24.5	Industrial
G	Painting	7,10,11,13	Toluene, 2-methylpropan-1-ol, Acetone, Propan-2-ol	LEV & EGV	23	Industrial / professional (for only PROC 11)
H	Spray painting	7	Toluene, 2-methylpropan-1-ol, Acetone, Propan-2-ol	LEV & EGV	22	Industrial
I	B/P (Bare Plate) manufacturing	1	Toluene, Xylene, Ethylbenzene, N-butyl acetate, 4-methylpentan-2-one, Ethyl acetate, styrene, Acetone, Butanone	LEV	21	Industrial
J	B/P leaching	1	Toluene, Xylene, Ethylbenzene, N-butyl acetate, 4-methylpentan-2-one, styrene, Acetone, Butanone	LEV	23	Industrial

LEV: Indoors with LEV, EGV: Indoors with enhanced general ventilation, GGV: Indoors with good general ventilation, LEV&EGV: Indoors with LEV and enhanced general ventilation, PROCs: Process Categories

는 추가적인 검증 자료로서 제공 하고자 하였다. 마지막으로 이러한 평가를 통해 화평법 제도 아래 사용되고 있는 작업장 노출 모델의 적합성 및 작업장 노출 평가를 개선하기 위한 방안이 무엇인지를 모색 하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 작업환경측정 값 및 ECETOC TRA 입력 변수

본 연구에서는 국내 10개의 사업장에서 다루는 각 화학물질들에 대하여 산업안전보건법¹⁸⁾ 제 42조(작업환경 측정) 제 1항 및 고용노동부고시 제 2011-55호(작업환경측정 및 지정 측정기관 평가 등에 관한 고시)에 따라, 연구목적으로 측정전문기관을 통해 사업장 별 4회씩 실시된 작업환경 측정 값을 활용 하였다. 작업환경 측정 값과 함께 작업환경 조건 및 작업환경을 파악할 수 있는 사진을 함께 제공 받았으며 제공받은 공정 종류와 공정 조건(작업온도, 환기시설 등) 및 사용된 화학물질(총 14가지 종류)의 목록 등을 Table 1에 정리하였다. ECETOC TRA의 변수로 들어가는 작업 공정 조건 중 작업시간 및 작업일수와 각 화학물질의 조성 및 호흡장치는 10개 사업장에 대해 모두 동일한 조건으로 모형에 적용되었다. 이는 ECETOC TRA의 대부분의 입력 변수 범주가 몇가지 범위안에서 선택하게끔 설정되어 있어

실제 사업장들의 작업 조건들이 다를지라도 ECETOC TRA에서는 동일한 조건으로 반영 될 수 밖에 없기 때문이다. 본 연구에서는 작업시간 및 작업일수의 경우 “>4 hr”, 각 화학물질의 조성의 경우 “25% 이상”, 호흡장치의 경우 “효율 90% 이상”이 모형에 적용되었다. ECETOC TRA의 주요 결정 변수인 PROC의 경우¹⁷⁾, 각 사업장 별 해당 공정 설명과 작업 환경 사진을 통해, ‘화학물질의 위해성에 관한 자료 작성 지침서’¹²⁾에서 제공하고 있는 “공정별/공점범주(PROC)” 표를 바탕으로 연구자의 판단을 통해 가능한 PROC 후보들을 선택하였다. 대부분의 사업장에서 하나의 공정만을 진행하는 것이 아니라 여러 공정이 복합적으로 이루어지기 때문에 같은 사업장에서 근무할지라도 작업자별로 PROC을 다르게 선택 할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 그런 가능성을 염두하고 각 사업장에 적용할 수 있는 가능한 모든 PROC을 Fig. 1과 같이 선정하였고 Table 1에 정리하였다.

2. ECETOC TRA 를 통한 작업장 흡입 노출량 예측 및 모형 평가 지표 계산

본 연구는 Fig. 1과 같이 각 사업장에서 사용하는 각 물질별 특성과 작업 공정조건을 ECETOC TRA 에 적용하여 흡입노출량을 계산하였다. 사용된 ECETOC TRA ver 3.1은 ECETOC 공식 홈페이지 (<http://www.ecetoc.org>)에서 다운로드 받아 활용하였다.

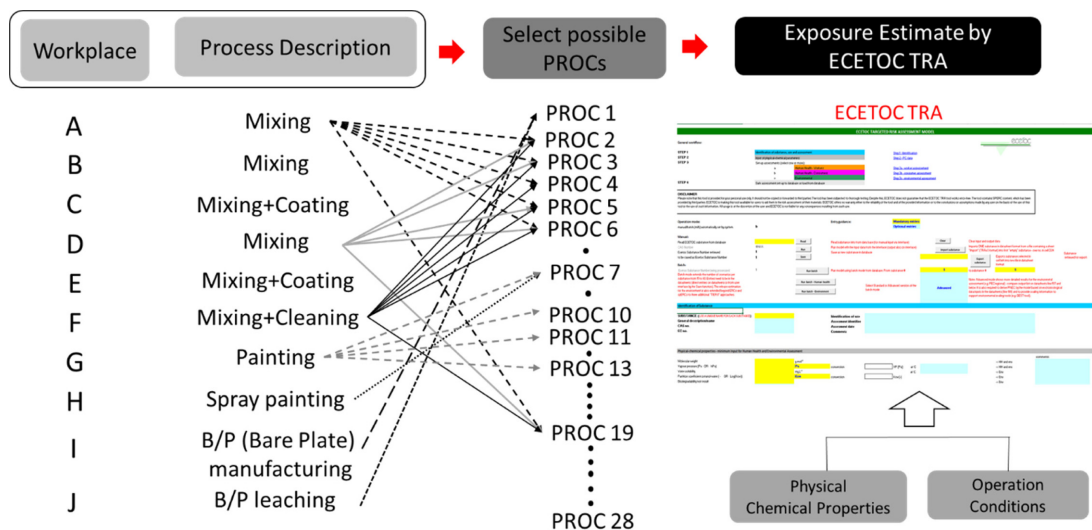


Fig. 1. Conceptual design for estimating Korean occupational exposure

Table 2. Physicochemical properties of substances needed for calculating worker exposure and RCR (The state of all substances are liquid)

Substance Name	CAS Number	Molecular Weight (mg/mol)	Long term Inhalation DNEL for worker (mg/m ³) (*)	Vapor Pressure (hPa)
Toluene	108-88-3	92.14	192	36.1
Butanone	78-93-3	72.11	600	115
Ethyl acetate	141-78-6	88.11	734	110.56
Ethyl acrylate	140-88-5	100	21	40
2-methylpropan-1-ol	78-83-1	74	310	16
N,N-dimethylformamide	68-12-2	73.09	15	3.60
Propan-2-ol	67-63-0	60.1	500	52.1
Methanol	67-56-1	32.04	260	169.27
Acetone	67-64-1	58.08	1210	240
Styrene	100-42-5	104.15	85	9.665
4-methylpentan-2-one	108-10-1	100.159	83	26.40
N-butyl acetate	123-86-4	116.16	300	15
Ethylbenzene	100-41-4	106.17	77	13
Xylene	1330-20-7	106.16	221	12.824

DNEL: Derived No Effect Level, (*) <https://www.dguv.de/ifa> (DNEL list of the DGUV)

10개 사업장에서 중복적으로 사용하고 있는 화학 물질들을 고려하여 총 14개의 화학 물질들에 대해 평가를 진행하였다. 물질의 상태, 분자량, 증기압 및 장기 흡입 노출에 대한 도출무영향수준(Derived No Effect Level: DNEL) 값이 ECETOC TRA의 작업자 노출 계산 및 RCR 계산에 적용되었고 그 해당하는 값들을 Table 2에 정리하였다. 본 연구에서는 앞서 언급한대로 ECETOC TRA의 작업장 노출량 예측 값 중 장기간 흡입 노출량만을 가지고 분석을 진행하였다(이하 본문에서 ‘예측 노출량’에 관한 것은 장기간 흡입 노출량을 뜻함). 장기간 흡입 노출량만을 가지고 모형을 평가한 이유는 단기간 흡입 노출량에 비해 상대적으로 보수적인 결과를 예측하기 때문에 ECETOC TRA의 한국 작업장 스크리닝 툴로서의 적합성을 평가하는데에는 더 적합하다고 판단하였기 때문이다.

각 물질의 PROC에 따른 예측 노출량 및 작업 환경 실측값과 각 물질의 DNEL값을 이용하여 식 (1)과 같이 위해도 결정비(Risk Characterization Ratio: RCR)를 구하였다. 예측값 및 실측값을 통해 구한 모든 RCR값에 대해 1보다 클 경우 위해도가 있다고 판단하였다.

$$RCR_{human} = \frac{Exposure}{DNEL} \quad (1)^{19)}$$

본 연구에서는 ECETOC TRA 모형 검증을 진행한 이전 연구들과 동일하게 실측값과 예측값 모두 각 값들의 분포 중 75번째 퍼센타일에 해당하는 값을 가지고^{11,20)} 식 (2)-(4)^{16,21)}와 같이 Bias, Relative bias, Precision을 구하여 실측값과 모형 예측치를 정량적 수치로 비교하였다. Bias는 로그스케일에서의 예측값과 실측값의 평균 차이를 나타내며 양의 Bias 값은 모델이 과대 평가 하고 있음을 의미한다. Relative bias는 두 값의 차이를 총 측정된 노출값의 퍼센트 비율로 나누어 구한 값을 의미하며 Precision은 bias의 표준편차로서 계산되는 값이다.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (2)$$

$$Relative\ bias = (e^{Bias} - 1) \times 100 \quad (3)$$

$$Precision = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - y_i) - bias]^2} \quad (4)$$

$\hat{y}_i = \ln(\text{the predicted estimated for the } i\text{th set of exposure in the validation data set})$

y_i = ln(the measured exposure for the *i*th set of exposure in the validation data set)

n = number of measurements in the validation data set

III. 결 과

1. 입력 변수에 따른 ECETOC TRA 모형의 예측 노출량 차이 분석

각 사업장 작업 공정에 맞게 선택된 모든 PROC

을 ECETOC TRA에 물질별로 적용하여 예측한 노출값을 Table 3과 같이 정리하였다. 동일한 환기 시설 조건에서 예측 노출량 값은 PROC에 따라 작게는 4배에서 크게는 2500배 까지 차이가 나타났다. 모형의 예측값과 실측값이 2500배 정도로 극심하게 차이 나는 경우는 PROC 1이 작업 공정 조건으로서 모형에 적용된 경우이다. 이는 PROC 1이 '노출 우려가 거의 없는 밀폐된 연속 공정'을 가정하고 있어 모형이 매우 작은 값의 노출량을 예측하도록 설정되어 있기 때문이다. PROC 1을 제외한 나머지 예측

Table 3. Estimation of inhalation exposure according to PROCs and Ventilation condition

Chemical	Ventilation	PROC										
		1	2	3	4	5	6	7	10	11	13	19
Toluene	LEV	0.0038	0.19	0.38	0.77	1.92	1.92	-	-	-	-	1.92
	EGV	-	0.58	1.15	2.30	5.76	5.76	28.79	5.76	57.59	5.76	5.76
	GGV	-	1.34	2.69	5.37	13.44	13.44	67.19	13.44	134.37	13.44	13.44
	LEV & EGV	-	-	-	-	-	-	3.36	1.34	26.87	1.34	-
Butanone	LEV	0.0030	0.75	1.50	3.00	7.51	7.51	-	-	-	-	7.51
	EGV	-	2.25	4.51	9.01	22.53	22.53	45.07	22.53	90.14	22.53	22.53
	GGV	-	5.26	10.52	21.03	52.58	52.58	105.16	52.58	210.32	52.58	52.58
Ethyl acetate	LEV	0.0037	0.92	1.84	3.67	9.18	9.18	-	-	-	-	9.18
	EGV	-	2.75	5.51	11.01	27.53	27.53	55.07	27.53	110.14	27.53	27.53
Ethyl acrylate	LEV	-	0.21	0.42	0.83	2.08	2.08	-	-	-	-	2.08
	EGV	-	0.63	1.25	2.5	6.25	6.25	-	-	-	-	6.25
2-methyl-propan-1-ol	LEV	-	0.15	0.31	0.62	1.54	1.54	-	-	-	-	1.54
	EGV	-	0.46	0.93	1.85	4.63	4.63	23.13	4.63	46.25	4.63	4.63
	LEV & EGV	-	-	-	-	-	-	2.70	1.08	21.58	1.08	-
N,N-dimethyl-formamide	LEV	-	0.03	0.09	0.15	0.15	0.15	-	-	-	-	0.30
	EGV	-	0.09	0.27	0.46	0.46	0.46	9.14	0.91	9.14	0.91	0.91
Propan-2-ol	GGV	-	0.88	1.75	3.51	8.76	8.76	43.82	8.76	87.65	8.76	8.76
	LEV & EGV	-	-	-	-	-	-	2.19	0.88	17.53	0.88	-
Methanol	EGV	-	-	-	-	-	-	20.03	10.01	40.05	10.01	-
Acetone	LEV	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LEV & EGV	-	-	-	-	-	-	2.19	0.88	17.53	0.88	-
Styrene	LEV	0.0043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-methyl-pentan-2-one	LEV	0.0042	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N-butyl acetate	LEV	0.0048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzene	LEV	0.0044	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Xylene	LEV	0.0044	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LEV: Indoors with LEV, EGV: Indoors with enhanced general ventilation, GGV: Indoors with good general ventilation, LEV&EGV: Indoors with LEV and enhanced general ventilation, - : non estimated, PROC: Process Categories

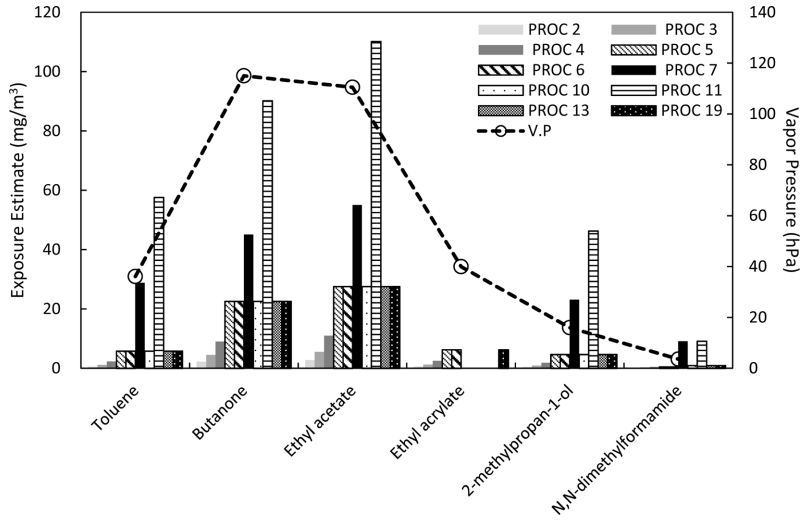


Fig. 2. Estimated exposure values of 5 kinds of chemical for each process category (PROCs) and vapor pressure of each chemical (red dot line)

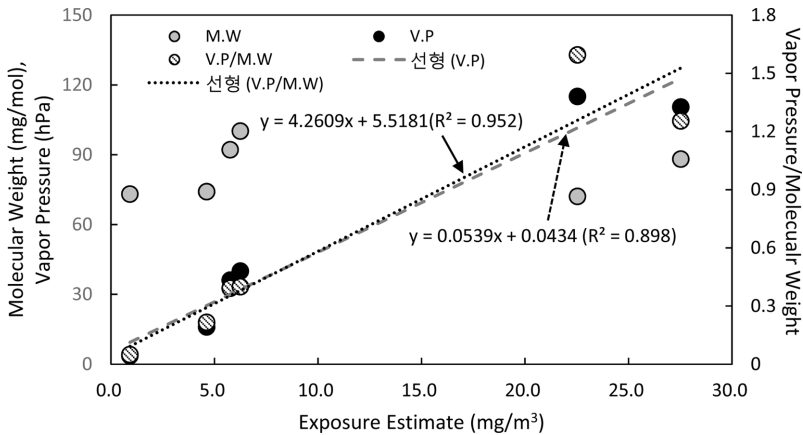


Fig. 3. Correlation between the exposure estimate values and chemical properties when PROC 19 was applied to ECETOC TRA (Vapor Pressure: V.P, Molecular Weight: M.W)

노출량값들을 비교하면 4~100배 정도의 PROC별 노출량 차이가 나타났다. 동일한 물질에 대해 PROC별 노출량의 크기를 Fig. 2와 같이 비교하면 대체적으로 다음과 같은 경향성을 나타내었다.

PROC 1 <<< PROC 2 < PROC 3 < PROC 4 < PROC 5, 6, 10, 13, 19 < PROC 7 < PROC 11

이 경향성은 물질과 환기시설 조건에 상관없이 동일하게 나타났다. 이 결과는 PROC별로 가정하고 있는 노출 조건 즉, 노출이 거의 없는 밀폐 공정(PROC 1), 간헐적 노출이 있는 밀폐 공정(PROC 2), 밀폐된

회분 공정(PROC 3), 간헐적 노출이 있는 회분 또는 합성 공정(PROC 4)인지 등에 따라 노출량의 상대적 크기가 결정됨을 보여준다. 또한 스프레이 작업(PROC 7,11)이 다른 공정에 비해 흡입 노출량이 크며 그중에서도 산업적 작업보다는 비산업적 작업(PROC 11)이 높음을 알 수 있다. 그러나 PROC 5, 6, 10, 13, 19는 각기 다른 공정임에도 불구하고 ECETOC TRA가 동일한 노출량을 예측하였다.

모형의 예측값이 물질 특성과 연관성이 있는지 확인하기 위하여 흡입 노출에 영향을 미칠것으로 예상

되는 증기압을²²⁾ Fig. 2와 같이 예측값과 비교하였다. Fig. 2를 보면 증기압이 상대적으로 높은 butanone과 ethyl acetate가 다른 물질에 비해 흡입 노출량이 높은 편임을 알 수 있다. 또한 Fig. 3과 같이 증기압과 분자량에 대해 각각 예측 노출량과의 상관성을 분석한 결과, 분자량의 경우 상관성이 거의 없었으나 증기압(V.P) 및 분자량으로 증기압을 나눈 값(V.P/M.W)은 양의 상관관계를 가짐을 확인하였다. 또한 “V.P/M.W”와 예측 노출량과의 상관계수($R^2: 0.95$)가

증기압과 예측 노출량과의 상관계수($R^2:0.90$)보다 미세하게 큼을 확인 하였고 이를 통해 “V.P/M.W”이 작업장 노출량 예측에 물성 지표로서 활용 될 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 각 사업장의 실제 환기 시설 조건 외 다른 환기 시설 조건을 모형에 적용하여 환기 시설 조건에 따른 노출량 값의 차이를 Table 3과 같이 정량적으로 확인하였다. Local exhaust ventilation (LEV)와 Enhanced general ventilation (EGV)을 모

Table 4. Descriptive statistics of Korean exposure measurement data, Bias and RCR by exposure situation

Workplace	Chemical	Measured exposure			Bias (Measured vs Estimated)	RCR		
		A.M	G.M	Min-Max		Measured A.M	Measured G.M	Estimated Max
A	Toluene	3.61	2.63	0.56-6.80	-1.65	1.88E-02	1.37E-02	1.00E-02
	Butanone	0.91	3.64	3.64	1.31	1.52E-03	6.06E-03	1.25E-02
	Ethyl acetate	59.28	39.60	6.96-118.3	-2.98	8.08E-02	5.40E-02	1.25E-02
	Ethyl acrylate	55.95	22.75	0.70-98.73	-4.38	2.66E+00	1.08E+00	9.92E-02
	2-methylpropan-1-ol	2.16	2.79	1.95-3.34	-1.58	6.96E-03	9.00E-03	4.97E-03
	N,N-dimethylformamide	4.30	4.27	3.69-5.02	-3.65	2.87E-01	2.85E-01	2.03E-02
B	Toluene	40.66	40.20	32.71-46.95	-2.89	2.12E-01	2.09E-01	3.00E-02
	Butanone	1.63	2.05	1.50-3.22	1.55	2.71E-03	3.42E-03	3.76E-02
	Ethyl acetate	9.21	9.10	7.76-11.53	0.23	1.25E-02	1.24E-02	3.75E-02
	Ethyl acrylate	1.57	1.16	0.51-3.83	0.50	7.48E-02	5.54E-02	2.98E-01
	N,N-dimethylformamide	3.80	3.67	2.96-5.70	-2.38	2.53E-01	2.44E-01	6.09E-02
C	Toluene	270.30	234.90	130.65-490.48	-2.48	1.41E+00	1.22E+00	7.00E-01
	Butanone	141.66	156.74	85.2-353.57	-0.84	2.36E-01	2.61E-01	3.51E-01
	Propan-2-ol	102.41	88.12	52.42-204.51	-1.83	2.05E-01	1.76E-01	1.75E-01
D	Toluene	166.87	137.73	83.75-364.33	-3.43	8.69E-01	7.17E-01	7.00E-02
	Butanone	5.46	4.70	1.66-8.15	1.26	9.09E-03	7.83E-03	8.76E-02
	Propan-2-ol	56.76	50.74	25.13-96.71	-2.86	1.14E-01	1.01E-01	1.75E-02
E	Toluene	15.61	13.49	7.75-27.25	-0.53	8.13E-02	7.02E-02	3.00E-01
	Butanone	2.00	1.98	0.69-5.13	2.46	3.34E-03	3.30E-03	1.50E-01
	Ethyl acetate	1.52	1.35	0.35-4.40	2.41	2.07E-03	1.85E-03	1.50E-01
	2-methylpropan-1-ol	1.10	0.50	1.38-3.36	2.22	3.55E-03	1.61E-03	1.49E-01
	Methanol	3.06	2.25	1.51-6.68	1.22	1.18E-02	8.67E-03	1.54E-01
	N,N-dimethylformamide	4.34	5.75	2.21-4.68	-1.09	2.89E-01	3.83E-01	6.09E-01
F	Toluene	3.42	2.53	0.56-6.24	-0.55	1.78E-02	1.32E-02	3.00E-02
	Butanone	3.95	4.43	1.79-7.83	0.42	6.59E-03	7.38E-03	3.76E-02
	Ethyl acetate	78.25	51.72	6.96-116.12	-2.19	1.07E-01	7.05E-02	3.75E-02
	Ethyl acrylate	67.17	26.48	0.70-100.97	-3.51	3.20E+00	1.26E+00	2.98E-01
	2-methylpropan-1-ol	3.11	2.24	6.39-0.31	-1.05	1.00E-02	7.24E-03	1.49E-02
	N,N-dimethylformamide	6.03	5.92	4.52-7.67	-2.88	4.02E-01	3.95E-01	6.09E-02

Table 4. Continued

Workplace	Chemical	Measured exposure			Bias (Measured vs Estimated)	RCR		
		A.M	G.M	Min-Max		Measured A.M	Measured G.M	Estimated Max
G	Toluene	5.56	2.96	0.25-9.66	-0.85	2.90E-02	1.54E-02	1.40E-01
	2-methylpropan-1-ol	2.21	4.11	2.81-6.02	-0.23	7.12E-03	1.33E-02	6.96E-02
	Acetone	5.59	4.32	1.34-10.01	-0.15	4.62E-03	3.57E-03	2.80E-02
	Propan-2-ol	13.59	26.80	22.68-31.69	1.13	2.72E-02	5.36E-02	3.51E-02
H	Toluene	4.65	2.53	0.26-10.89	-0.70	2.42E-02	1.32E-02	1.75E-02
	2-methylpropan-1-ol	2.33	4.46	3.31-6.01	-0.39	7.51E-03	1.44E-02	8.70E-03
	Acetone	17.16	10.33	1.05-28.74	-1.66	1.42E-02	8.54E-03	3.50E-03
	Propan-2-ol	25.59	8.16	0.21-55.96	1.07	5.12E-02	1.63E-02	4.38E-03
I	Toluene	1.05	0.96	0.45-1.43	-5.88	5.48E-03	4.99E-03	2.00E-05
	Xylene	0.86	0.63	0.18-1.57	-5.70	3.88E-03	2.84E-03	2.00E-05
	Ethylbenzene	0.59	0.29	0.06-1.23	-5.46	7.68E-03	3.72E-03	5.75E-05
	N-butyl acetate	1.83	0.69	0.05-3.66	-6.54	6.09E-03	2.29E-03	1.61E-05
	4-methylpentan-2-one	1.04	0.48	0.03-2.68	-6.04	1.25E-02	5.83E-03	5.03E-05
	Ethyl acetate	1.03	0.72	0.16-1.79	-6.10	1.40E-03	9.77E-04	5.00E-06
	Styrene	1.60	1.10	0.14-3.90	-6.45	1.88E-02	1.30E-02	5.11E-05
	Acetone	0.95	1.12	0.52-1.68	-6.50	7.84E-04	9.25E-04	2.00E-06
J	Butanone	0.48	0.35	0.05-1.10	-5.66	8.07E-04	5.78E-04	5.01E-06
	Toluene	2.70	2.42	1.23-4.31	-6.84	1.41E-02	1.26E-02	2.00E-05
	Xylene	7.04	5.61	1.86-12.46	-7.73	3.19E-02	2.54E-02	2.00E-05
	Ethylbenzene	1.72	1.55	0.99-2.89	-6.21	2.23E-02	2.01E-02	5.75E-05
	N-butyl acetate	4.31	3.90	2.41-6.90	-7.08	1.44E-02	1.30E-02	1.61E-05
	4-methylpentan-2-one	0.84	0.66	0.22-1.65	-5.56	1.01E-02	7.92E-03	5.03E-05
	Styrene	0.39	0.47	0.24-0.76	-4.95	4.60E-03	5.49E-03	5.11E-05
	Acetone	1.69	1.17	0.24-3.20	-6.92	1.40E-03	9.69E-04	2.00E-06
Butanone	0.26	0.30	0.13-0.57	-4.89	4.35E-04	4.93E-04	5.01E-06	

A.M: Arithmetic Mean, G.M: Geometric Mean, RCR: Risk Characterization Ratio

두 갖춘 사업장의 경우 가장 낮은 노출량이 예측되었다. 또한 LEV와 EGV를 모두 갖춘 사업장은 LEV만 갖춘 사업장과 EGV만 갖춘 사업장 및 Good general ventilation (GGV)만 갖춘 사업장에 비해 각각 약 7%, 약 27%, 약 67% 정도의 저감된 노출량을 나타내었다. 단, PROC 7이 적용 될 경우, LEV에 대한 저감 효율이 다른 PROC이 적용되었을 때보다 약 2~5% 정도 높고 PROC 11의 경우 저감 효율이 약 10% 정도 떨어 짐을 확인하였다.

2. PROC에 따른 ECETOC TRA의 실측값과의 비교를 통한 모형 평가 및 RCR비교

각 사업장별 작업환경 측정 실측값들에 대한 산술 평균값과 기하 평균 값 및 범위를 Table 4에 정리하였다. 또한 Fig. 4(a), (b)와 같이 ECETOC TRA의 PROC별 예측 노출 값들에 대한 산술 평균과 기하 평균 및 최대값을 가지고 실측값과 비교함으로써 모형의 예측력을 평가하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 특정 몇몇 값을 제외하고는 어떤 통계적 처리된

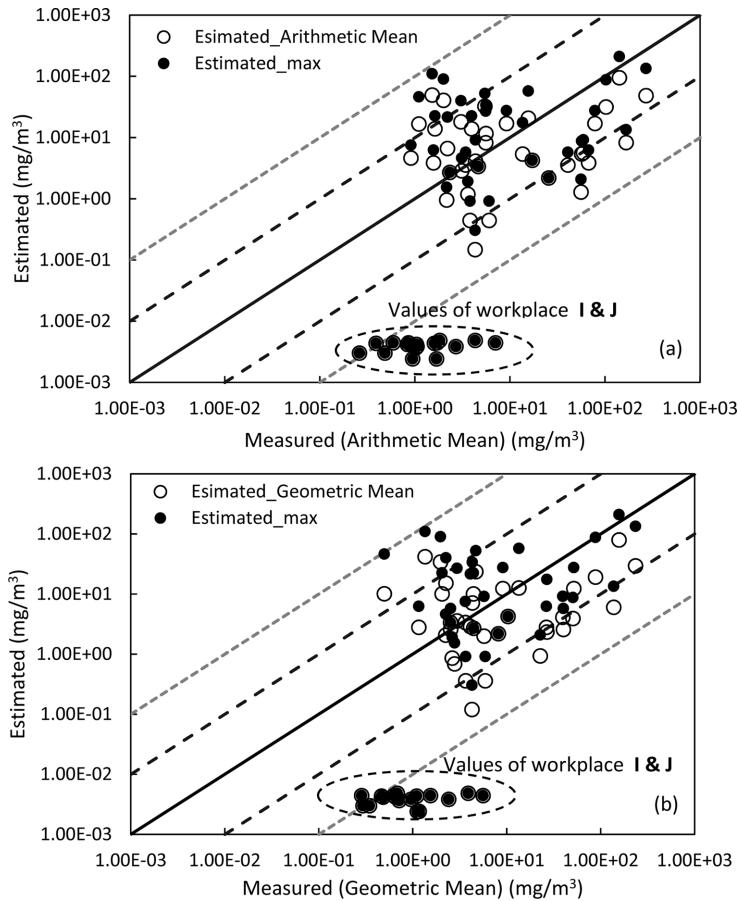


Fig. 4. Scatter plots of measured value versus estimated values by statistical average method (a) arithmetic mean and (b) geometric mean

값을 이용하여 비교하든지 ECETOC TRA의 예측 값이 모형의 신뢰성을 판단하는 기준인, 10^2 범위 내에^{23,24)} 있음을 확인 하였다. 이를 통해 국내 작업장 노출을 예측함에 있어 ECETOC TRA 모형의 예측력이 어느 정도 신뢰성을 갖추고 있다고 판단 할 수 있다. Fig. 4(a)와 (b) 하단의 검정 점선으로 표시된 값들은 모형이 실제보다 매우 과소평가 하고 있음을 보여준다. 그러나 이 값들은 앞 절에서 설명한 바와 같이 작업 공정 조건으로 PROC 1만 적용하여 모형을 평가한 사업장 I, J에 해당하는 값들이다.

각 통계적으로 처리된 값들에 대해 예측값과 실측값의 차이를 구한 후 전체 Exposure situation (ES, 53개) 중 과대 평가 하는 것과 과소 평가하는 것의 개수의 비율을 계산하였다. 계산 결과 산술평균값 적용시 약 70%, 기하 평균값 적용시 77%가 과소 평

가 되고 있음을 확인하였다. PROC에 따른 예측 노출값 중 최대값을 가지고 비교 하였을 때에도 과소 평가 된 경우가 약 66% 정도 나타났으며 이는 어떤 PROC을 적용해도 한국 작업장에 대해 ECETOC TRA가 대체적으로 노출량을 과소 평가 하고 있음을 의미한다. Table 4의 Bias 값 중 모형이 과대 평가 하고 있음을 나타내는 양의 Bias 값도 전체 ES 중에서 약 20% 정도에 불과해 앞선 결과와 일관된 결과를 보여주었다. 또한 Table 5와 같이 물질별 Bias ±Precision과 Relative Bias을 구하였고 이 값을 통해 본 연구에서 다루어진 ES에 대한 ECETOC TRA의 전반적인 Bias±Precision이 -2.91 ± 1.62 정도임을 확인하였다. 이와 같은 결과를 Lee 등의¹⁶⁾ 의 ECETOC TRA와 ART 및 Stoffenmanager 모형의 전반적인 Bias±Precision을 구한 값과 비교하면(Table

Table 5. Calculation of the lack of agreement for the evaluation of ECETOC TRA according to chemicals

Chemical	Bias± Precision	Relative Bias	Data Reference
Toluene	-2.02±1.75	-86.75	
Butanone	0.69±1.93	99.01	
Ethyl acetate	-0.98±2.48	-62.62	
Ethyl acrylate	-2.47±2.38	-91.51	
2-methylpropan-1-ol	-0.27±1.93	-23.89	
N,N-dimethylformamide	-2.56±2.67	-92.29	
Propan-2-ol	-1.29±2.02	-72.52	This study
Methanol	1.22±0.62	237.90	
Acetone	-2.24±3.19	-89.33	
Xylene	-6.71±1.44	-99.88	
Ethylbenzene	-5.84±0.53	-99.71	
N-butyl acetate	-6.81±0.38	-99.89	
4-methylpentan-2-one	-5.80±0.34	-99.70	
Styrene	-5.70±1.06	-99.67	
ECETOC TRA	-1.03±8.88	-	Lee et. al ⁽⁶⁾
ART	-0.53±2.11	-	
Stoffenmanager	-1.32±5.88	-	

5) ECETOC TRA 모형은 다른 모형들에 비해 전반적으로 예측력이 낮은 편이었으며 단지, butanone, ethyl acetate, 2-methylpropan-1-ol과 같은 물질을 예측할 때에마 ART 모형의 예측력과 비슷한 수준을 나타내었다. 이와 같은 연구 결과를 가지고 ECETOC TRA모형의 한국 작업장 노출 예측력을 일반화 할 수는 없으나 다양한 ES에 대한 ECETOC TRA 평가시 비교 데이터로서 활용 될 수 있을 것이라 판단된다.

작업환경 실측치의 평균값과 ECETOC TRA의 노출 예측값 중 최대값을 이용하여 각각의 위해도 결정비(RCR)를 구하였고 이를 통해 전체 ES중에서 세 가지 경우를 제외하고는 RCR값이 1 미만으로, 국내 작업장 흡입 노출 위해도가 낮은 편임을 확인하였다 (Table 4). 이는 Table 1의 각 사업장 작업 환경 조건들에서 확인 할 수 있듯이 국내 사업장의 경우, 환기 시설의 종류나 환기율은 비록 다를지라도, 환기시설 자체는 대부분 갖추고 있어 노출 저감 관리가 잘 되고 있다고 유추할 수 있다. 그러나 실측값을 이용하여 구한 RCR 값 중, 1 보다 큰, 즉 위해

하다고 판단 할 수 있는 A 작업장의 ethyl acrylate와 C 작업장의 toluene 및 F 작업장의 ethyl acrylate에 대해 모형의 예측값으로 RCR을 구하면 모두 1 미만의 값을 나타내었다. 특별히 A작업장의 ethyl acrylate의 실측값을 이용한 RCR과 예측치를 이용한 RCR값의 차이가 무려 100배 정도 나타났다. 이와 같은 결과는 앞서 ECETOC TRA가 국내 작업장 노출량 예측에 있어 과소 평가 하고 있다는 결과와 연관 지을 수 있으며 ECETOC TRA의 국내 작업장 노출 스크리닝 툴로서의 적합성이 제대로 평가되어 저야 한다는 것을 시사한다.

IV. 고 찰

본 연구를 통해 한국 작업장 흡입 노출에 대한 ECETOC TRA 모형 예측의 conservatism이 낮은 편임이 확인되었다. 그러나 본 연구가 10개의 사업장의 몇몇 물질에 대한 장기간 흡입 노출 평가만을 진행하였고 작업 환경 실측값의 샘플 개수도 충분하지 않았기 때문에 이 결과 만으로 ‘국내 작업장에 ECETOC TRA 모형의 적합성이 떨어진다’라고 결론을 내릴 수는 없다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과가 ‘ECETOC TRA가 ART나 Stoffenmanager와 같은 Tier 2모형에 비해 덜 보수적인 결과를 나타낸다’는 유럽의 최근 연구 결과들과 유사한 경향성을 나타냈다는⁸⁻¹⁰⁾ 것에 주목할 필요가 있다. 즉, ECETOC TRA를 지금과 같이 그대로 사용하는 것이 아니라 다양한 노출 상황이 고려된 충분한 양의 한국작업 환경 노출 실측값들을 활용하여 장기간 및 단기간 흡입 노출에 대한 ECETOC TRA의 체계적인 검증이 진행되어야 한다는 것을 의미한다.

한국 작업장 노출 평가를 개선하기 위해 ECETOC TRA의 주요 변수인 PROC에 대해 초점을 맞출 필요가 있다. 본 연구에서 확인한 바와 같이 같은 작업 현장에서 근무할 지라도 적용 될 수 있는 PROC은 복잡적일 수 있고 이는 ECETOC TRA의 노출 예측량 차이를 야기시킬 수 있다. 국내 작업장의 공정 분류와 ECETOC TRA에 적용하는 PROC의 매칭 작업을 진행하고 그 결과를 작업 현장에 반영시키는 것이 필요하며 명료한 지침서를 제공하는것이 필요하다.

현재 EU REACH 지침서에 제공하고있는 PROC

목록은 PROC 28까지 업데이트 되었으며 화평법에서도 PROC 28을 제외하고는 EU REACH와 동일한 PROC 목록을 지침서에 제공하고 있다. 그러나 현재까지 개발된 ECETOC TRA 모형은 PROC 25까지만 적용 할 수 있는 상태이기 때문에 PROC 26, 27a, 27b, 28에 해당하는 공정의 경우 ECETOC TRA 모형을 적용 할 수 없다. 뿐만 아니라 지금 사용하고 있는 PROC 코드가 유럽에서 개발되었기 때문에 유럽의 주요 제조산업의 작업 공정만을 반영한다는 점에서 지금 개발된 PROC만을 가지고 반도체와 디스플레이 산업 중심의²⁵⁾ 우리나라 제조 작업 공정을 모두 분류할 수 있는지에 대한 근본적인 검토가 필요하다. 특별히 반도체 및 디스플레이 작업공정 모두 밀폐된 청정실에서 대부분의 작업이 진행되기 때문에 ECETOC TRA를 사용하여 노출을 평가 할 경우 ‘노출 우려가 거의 없는 밀폐된 연속 공정’에 대한 공정 코드인 PROC 1을 선택하여 노출량을 예측할 수 밖에 없다. 수백개의 화학물질을 동시에 사용하고 있는 작업 현장에서 PROC 1을 적용하여 얻은 매우 작은 노출량 값을 가지고 전체 작업장을 안전하다고 판단하여 관리하는 것은 무리가 있다. 이러한 특수 공정들에 있어 ECETOC TRA를 사용하여 평가하는 것이 적합한지, 적합하다면, 어떤 PROC를 적용 할 수 있는지에 대한 연구가 진행되어야 한다. 만약 현재까지 개발된 PROC 중에서 반영 할 수 없다면 국내에서 자체적으로 새로운 PROC 개발을 조속히 진행 해야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 실제 한국 작업 실측값과 작업장의 조건을 이용하여 화평법에서 권장하고 있는 작업장 노출 모델인 ECETOC TRA를 평가하였다. 작업장 현장에서 주어지는 공정 조건을 가지고 ECETOC TRA의 주요 입력 조건인 PROC의 가능한 후보들을 추정하여 같은 조건에서 PROC에 따라 흡입 노출 예측량이 얼마나 달라지는지 확인 하였다. 실측값과의 ECETOC TRA의 평가를 통해 ECETOC TRA의 국내 작업장에 대한 노출 예측결과가 신뢰할 수 있는 수준임을 확인 하였다. 그러나 실측값을 이용한 RCR과 예측 노출량을 이용한 RCR값의 차이 및 각 노출값들 사이의 Bias 분석을 통해 모형이 상당 부

분 과소 평가 하고 있음도 확인되었다. 본 연구의 결과를 통해 ECETOC TRA를 화평법 제도하에 제대로 활용하기 위해서는 더 다양한 노출 상황에서의 작업장 실측값과의 모형 평가가 필요하며 한국 작업장 공정 분류의 PROC과의 매칭 작업에 대한 명료한 가이드라인 및 한국 작업장 상황에 맞는 추가적인 PROC 개발 검토의 필요성이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2018년 한국과학기술연구원의 국제협력 연구과제(No. 21801)와 2017년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-17-01-KIST Europe)*의 지원 받아 수행되었습니다.

References

1. Korea ministry of government legislation. Act on registration, evaluation, etc. of chemical. <http://law.go.kr>. [accessed 23 January 2019].
2. National institute of environmental research. Guidance for make chemical safety report. 2017. p. 197-198.
3. Yoon C, Ham S, Park J, Kim S, Lee S, Lee K, et al. Comparison between the Chemical Management Contents of Laws Pertaining to the Ministry of Environment and the Ministry of the Employment and Labor. *J Environ Health Sci*. 2014; 40(5): 331-345.
4. Moon J, Ock J, Jung U-H, Ra J-S, Kim K-T. Occupational Exposure Assessment for Benzene Using Exposure Models (ECETOC TRA and Stoffenmanager) and Applicability Evaluation of Exposure Models in K-REACH. *J Environ Health Sci*. 2018; 44: 460-467.
5. Clayton C, Mosquin P, Pellizzari E, Quackenboss J. Limitations on the uses of multimedia exposure measurements for multipathway exposure assessment-Part I: handling observations below detection limits. *Quality Assurance*. 2004; 10(3-4): 123-159.
6. European Chemicals Agency. Chesar 3 User manual. 2016. https://chesar.echa.europa.eu/documents/2326902/22375900/Chesar3UserManual_en.pdf. [accessed 28 February 2019].
7. European Chemicals Agency. Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assess-

- ment Chapter R.14: Occupational exposure assessment. 2016. p. 48-70.
8. Kupczewska-Dobacka 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.
 9. Spinazzè A, Lunghini F, Campagnolo D, Rovelli S, Locatelli M, Cattaneo A, et al. Accuracy evaluation of three modelling tools for occupational exposure assessment. *Annals of work exposures and health*. 2017; 61(3): 284-298.
 10. Van Tongeren M, Lamb J, Cherrie JW, Maccalman L, Basinas I, Hesse S. Validation of lower tier exposure tools used for REACH: comparison of tools estimates with available exposure measurements. *Annals of work exposures and health*. 2017; 61(8): 921-938.
 11. Landberg HE, Axmon A, Westberg H, Tinnerberg H. A study of the validity of two exposure assessment tools: Stoffenmanager and the Advanced REACH Tool. *Annals of work exposures and health*. 2017; 61(5): 575-588.
 12. Schinkel J, Warren N, Fransman W, Van Tongeren M, McDonnell P, Voogd E, et al. Advanced REACH Tool (ART): calibration of the mechanistic model. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011; 13(5): 1374-1382.
 13. Ishii S, Katagiri R, Kitamura K, Shimojima M, Wada T. Evaluation of the ECETOC TRA model for workplace inhalation exposure to ethylbenzene in Japan. *Journal of Chemical Health and Safety*. 2017; 24(1): 8-20.
 14. Lee EG, Lamb J, Savic N, Basinas I, Gasic B, Jung C, et al. Evaluation of Exposure Assessment Tools under REACH: Part I-Tier 1 Tools. *Annals of work exposures and health*. 2018; 63(2): 2018-2229.
 15. Lee JH, Lee KS, Hong MK. Evaluation of the Application of a European Chemical Risk Assessment Tool in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2012; 22(3): 191-199.
 16. Lee S, Lee K, Kim H. Comparison of Quantitative Exposure Models for Occupational Exposure to Organic Solvents in Korea. *Annals of work exposures and health*. 2018; 63(2): 1-21.
 17. 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 Analysis*. 2015; 35(2): 211-225.
 18. Korea ministry of government legislation. Occupational Safety and health act. <http://law.go.kr>. [accessed 13 March 2019].
 19. Arnold SM, Greggs B, Goyak KO, Landenberger BD, Mason AM, Howard B, et al. A quantitative screening-level approach to incorporate chemical exposure and risk into alternative assessment evaluations. *Integrated environmental assessment and management*. 2017; 13(6): 1007-1022.
 20. Koppisch D, Schinkel J, Gabriel S, Fransman W, Tielemans E. Use of the MEGA exposure database for the validation of the Stoffenmanager model. *Annals of occupational hygiene*. 2011; 56(4): 426-439.
 21. Walther BA, Moore JL. The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography*. 2005; 28(6): 815-829.
 22. Tielemans E, Schneider T, Goede H, Tischer M, Warren N, Kromhout H, et al. Conceptual model for assessment of inhalation exposure: defining modifying factors. *Annals of occupational hygiene*. 2008; 52(7): 577-586.
 23. RIVM. Validating simplebox-computed steady-state concentration ratios. 2004. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607220010.html>. [accessed 25 March 2019].
 24. RIVM. Predictions by the multimedia environmental fate model SimpleBox compared to field data: Intermedia concentration ratios of two phthalate esters. 2003. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607220008.html>. [accessed 26 March 2019].
 25. Jae Pil Y, Hyun Joon S. Portfolio Selection Strategy with Management Efficiency and Consideration of Growth Potential of Semiconductor and Display Corporations. *Asia-Pacific Journal of Business & Commerce*. 2012; 4(2): 89-107.

<저자정보>

김기은(박사후 연구원), 김종운(선임 연구원),
전현표(선임 연구원), 김상현(교수), 정연승(학생)