

국내 디클로로메탄 제조 · 사용 사업장 근로자의 공정별 노출수준에 대한 작업환경측정값과 ECETOC TRA 모델값 비교연구

정수진 · 배계완¹ · 이나루*

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ¹한국산업안전보건공단

Comparative Study of Korean Workers' Exposure to Dichloromethane by Process Category between Work Environment Monitoring Program and ECETOC TRA

Sujin Jeong · Gyewan Bae¹ · Naroo Lee*

Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI),
Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA)
¹Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA)

ABSTRACT

Objectives: By law, companies in Korea must periodically measure workers' exposure to harmful chemicals (the system is called the Work Environment Monitoring Program (WMP)[a]) and report the results to the government. The government also measures exposure to monitor the WMP's reliability (called Reliability Assessment (RA) for WMP[b]). The issue is that measured data from these two sources are so different that the objectivity of WMP needs to be confirmed by comparing the results using the European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals' Targeted Risk Assessment (ECETOC TRA).

Methods: Step 1: Data collection from WMP reports submitted by companies (n=586) and RA for WMP written by the government (n=33). Step 2: Data Standardization by key information included. Step 3: Data conversion to input-variables required to run the ECETOC TRA model, and run the model with specific data (n=514) which meet the predetermined exposure scenario. Step 4: Statistical data analysis by process category (PROC) and ventilation type from each source ([A] and [B]). Step 5: Additional analysis of any unexpected results.

Results: The process categories of the production and handling of Dichloromethane were classified into 12 PROCs, and ten of them were selected to run ECETOC TRA. Modeled values tended to be higher than measured values from both sources. For the measured values from WMP, RCR distribution by PROC was narrow (0.197-0.267, 95% CI) and did not have a relationship with ventilation type, which differs from the tendency of the modeling result. Meanwhile, the measured values from RA for WMP were relatively widely distributed (0.301-1.177, 95% CI) by PROC. In particular PROCs (13,19) were high enough to exceed 1. Also, they become low with better ventilation types and appear differently depending on the ventilation type, similar to the model result.


Conclusions: This study revealed that ECETOC TRA might have the potential to serve as a screening tool for exposure assessment and to be used as assistive method for WMP to estimate exposure. Further empirical study is required to confirm its availability as a screening tool.


Key words: dichloromethane, ECETOC TRA model, work environment monitoring, risk assessment, process category


*Corresponding author: Naroo Lee, Tel: 042-869-0351, E-mail: naroollee@kosha.or.kr

30, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Republic of Korea

Received: June 9, 2021, Revised: November 17, 2021, Accepted: December 15, 2021

 Su Jin Jeong <https://orcid.org/0000-0001-9476-9969>

 Gye Wan Bae <http://orcid.org/0000-0001-7816-7845>

 Naroo Lee <http://orcid.org/0000-0003-1483-6928>

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.

I. 서 론

화학물질 취급 근로자의 건강장해를 예방하려면 작업 환경의 화학물질 노출수준을 파악하여야 한다. 노출평가 방식 중 공기중 화학물질의 직접 측정은 선호되는 방식이지만 시간과 공간에 따라 값이 변하며 활용 가능한 측정 방법과 자원이 제한적이라는 한계가 있어 이 방식으로 사업장의 모든 공정에서 물질의 노출수준을 평가하기는 쉽지 않다(ECHA, 2015).

현시점에서 국내 작업장의 노출평가는 산업안전보건법 제125조에서 정한 작업환경측정제도에 의한 측정 방식으로 이뤄지고 있다. 그러나 국내 작업환경측정제도에서 사업장의 노출수준은 왜곡되고 있을 가능성이 있다(Kim et al., 2019). 일례로 법적 노출기준이 강화된 이후, 해당 물질에 대한 사업장의 측정값이 강화된 노출기준보다 낮은 수치로 부자연스럽게 낮아졌다(Kim et al., 2019). 또한 정부에 보고된 작업환경측정 결과 상으로는 노출기준 초과 사업장 수가 점차 감소하는 추세였는데 직업병 발생 사업장을 대상으로 작업환경측정을 다시 실시해보니 대부분의 사업장에서 화학물질 노출수준이 노출기준을 초과하기도 했다(Kang et al., 2007). 이러한 이유로 화학물질 노출수준 실태를 올바르게 파악하기 위한 수단을 마련할 필요가 있다.

한편, 다른 노출평가 방식으로는 노출평가용 모델을 활용한 노출수준 추정이 있다. 노출평가용 모델은 모델 실행에 필요한 변수들을 입력하기만 하면 공기중 화학물질 농도를 직접 측정하지 않고도 화학물질의 노출수준을 예측할 수 있는 방법이다. 유럽에서는 이미 활발하게 사용되고 있는 방식으로, 2007년 유럽에 신화학물질관리제도(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH)가 도입된 이후부터 노출평가용 모델은 업데이트와 검증을 거듭하며 성능이 꾸준히 보완되고 발전해왔다(Lee et al., 2019). 일부 프로그램은 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)에서 화학물질 안전성 평가 도구로 추천되고 있기도 하다(ECHA, 2016). 또한 ECHA에서는 보유하고 있는 정보의 수준과 화학물질의 위험성 정도에 따라 위험성 평가를 순차적으로 실시하는 단계별 접근방식(tiered approach) 노출평가의 장점으로 불필요한 요소를 줄일 수 있다는 점을 제시하고 있는데, 이 접근방식을 활용하면 사업주는 적은 정보로도 보수적인 위험성평가를 실시할 수 있을 뿐 아

니라 불필요한 위험성 관리대책(Risk Management Measure, RMM) 수립으로 인한 비용을 줄일 수 있어 한정된 자원을 효율적으로 사용하여 근로자 건강을 보호할 수 있다(ECHA, 2017). 이처럼 모델 활용은 측정 방식이 가지지 못한 장점이 있기 때문에 국내에서도 모델을 활용한 노출수준 평가가 가능해진다면 사업장에서 매우 반길 것이다. 따라서 국내 작업환경의 실측값을 이용한 실증적 연구를 충분히 실시함으로써 국내에서의 모델 활용 가능성을 확인할 필요가 있다(Kim et al., 2019).

이에 본 연구에서는 국내 작업환경측정 및 작업환경측정 신뢰성평가 결과를 수집하고 노출평가용 모델을 실행하여 측정값과 모델값을 비교함으로써 국내 디클로로메탄의 고위험 공정범주를 파악하고 디클로로메탄 노출수준 관리를 위한 보조수단으로서 모델의 활용 가능성을 알아보고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상 결정

1) 활용 모델: ECETOC TRA

노출평가용 모델로는 유럽화학물질 생태독성 및 독성센터(European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical, ECETOC)에서 개발한 화학물질 위해도 평가 도구(Targeted Risk Assessment, TRA)를 대상으로 선정하였다. ECETOC TRA는 개별적으로 이뤄진 이전 연구들에서 모든 물질과 Process category (PROC)에 대해서는 아닐지라도 일반적으로 실제 노출수준보다 보수적으로 평가하는 모델로 평가되었다(ECHA, 2016). 이 모델은 공정범주(Process Category, PROC)별 노출수준을 추정하는 모델이고 26가지 PROC에 적용할 수 있다(ECETOC, 2012). 또한 ECETOC TRA는 노출 관리의 초기단계에서 스크리닝(screening) 목적으로 사용하는 Tier-1 모델이어서 모델 실행에 필요한 입력변수의 수가 적고 모델이 간단하여 이해하기 쉬운 편이다(Schlueter & Tischer, 2020). 그렇기 때문에 국내 작업환경측정 데이터베이스(database, DB)를 활용하여 화학물질의 측정값과 모델값을 비교하고 공정범주별 노출수준과 고위험 공정이 무엇인지 파악하기 위한 목적으로 활용하기 좋은 모델이다. 모델의 활용범위는 근로자 노출평가(worker exposure assessment) 내 흡입 노출로 한정하여 화학물질 흡입 노출로 인한 근로

자의 건강 영향 평가를 실시하였다.

모델을 실행하기 위해 필요한 입력변수는 물질의 정체성(identification of substance), 물리화학적 특성(physico-chemical properties), 공정정보(process information), 독성값(참고치)(reference values), PROC, 세팅타입(type of setting), 성상(state of matter), 분진날림성(dustiness of solids), 작업시간(duration of activity), 환기방법(ventilation type), 호흡기보호구 효율(efficiency of respiratory protection), 제품 내 물질의 함유량(substance in preparation), 피부 보호구 APF(Assigned Protection Factor of dermal personal protection equipment)이다(ECETOC, 2017). 그 중 물질의 정체성에는 물질명(substance name)과 CAS No.가 포함되며, 모델 실행 결과에 영향을 미치지 않는다. 물리화학적 특성에는 분자량(molecular weight), 증기압(vapor pressure), 수용해도(water solubility), Log Kow, 생분해성 실험 결과(biodegradability test result)가 포함되며, 다른 입력변수와 함께 모델의 노출 추정치(모델값)를 결정한다. 독성값(참고치)(indicative reference value)은 장기간 흡입 노출기준(long-term inhalation occupational exposure limit)으로 모델에서 도출한 노출 추정치(모델값)의 위해도를 결정하는 기준이 된다. 그리고 여러 입력변수 중 모델의 결과값에 영향을 크게 미치는 주요변수는 공정변수와 환기방법이다(Kim et al., 2019).

2) 대상 물질: 디클로로메탄

ECETOC TRA는 단일물질 평가에 적합한 모델이므로 대상 물질은 디클로로메탄 한 가지 물질로 제한하였다. 디클로로메탄은 유럽 화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)의 GHS(Globally Harmonized System) 조화된 분류(harmonized classifications)에서 '발암성 구분2'로 분류되는 물질로 고용노동부와 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 디클로로메탄의 8시간 시간가중노출기준(Time Weighted Average, TWA)을 50ppm으로 제안하고 있다(MoEL, 2018). 디클로로메탄의 2017년 배출량은 2007년 대비 2.83배인 약 3,403톤으로 증가하였으며 화학물질 배출량 조사 대상 물질 중 5위에 해당한다(NICS, 2017).

연구 범위는 2019년도 디클로로메탄 제조·사용 사업장 근로자의 흡입을 통한 디클로로메탄 노출수준으로

결정하였다. 모델의 결과는 입력값에 크게 좌우되므로 정확한 정보 수집을 위해 측정값은 두 가지 출처에서 수집하였다(Moon et al., 2018). 국내 작업환경측정 실태를 파악하기 위한 측정값(측정값1)은 2019년 고용노동부에 보고된 디클로로메탄 대상 작업환경측정DB 586건에서 수집하였고 정확도의 판단 기준이 되는 측정값(측정값2)은 산업안전보건법 제127조(작업환경측정 신뢰성평가)에 의거하여 안전보건공단에서 디클로로메탄 제조·사용 공정을 대상으로 실시한 2019년도 작업환경측정 신뢰성평가 보고서 33건에서 수집하였다. 각 자료에서는 측정값뿐 아니라 사업장 내 작업환경과 노출수준에 관한 정보 또한 수집되었다.

2. 자료 수집 및 데이터 가공

자료 수집 및 데이터 가공 흐름도는 Figure 1과 같다. 자료의 수집은 작업환경측정DB와 작업환경측정 신뢰성평가 보고서에서 작업환경에 관한 정보를 추출하여 항목별로 분리기재(1단계)하였다. 자료의 가공은 연구자의 주관을 최대한 배제하고 오타 등으로 인한 단순오류들을 방지할 수 있도록 항목별 자료를 주요 내용에 따라 표준화(2단계)하는 단계를 거친 뒤 모델실행용 입력변수로 변환(3단계)하였다. 각 항목별 정보를 2단계에서 3단계로 변환하는 기준은 Table 1과 같다.

1) 1단계: 수집항목 결정 및 데이터화

작업환경측정DB는 작업환경측정기관에서 고용노동부에 제출한 산업안전보건법 시행규칙 별지 제83호서식에 해당하는 '작업환경측정 결과표'에서, 작업환경측정 신뢰성평가 자료는 안전보건공단의 작업환경측정 신뢰성평가 보고서에서 수집하였다. 작업환경에 관한 정보가 종합적으로 기재되어 있는 작업환경측정DB와 작업환경측정 신뢰성평가 보고서는 모두 일반문서 형식의 자료여서 모델 실행에 활용하기 위해서는 관련내용 전체 또는 일부를 발췌하거나 요약하여 항목별로 분리 기재하여야 했다. 각 자료에서 모델을 실행하기 위한 기초 정보로서 측정값, 사업장 정보(업종, 생산품 등), 공정명, 단위작업장소, 세부 공정내용, 제품명 및 디클로로메탄 함유량, 제조 또는 사용 여부, 사용 용도, 월 취급량, 환기방법을 수집하여 항목별로 기재하고, 각 측정건마다 데이터번호를 부여하여 데이터화하였다. 예를 들어 작업환경측정 결과표의 '작업공정별 유해요인 분포실태'에 '작업자가 호이스트를 사용하여 디클로로메탄

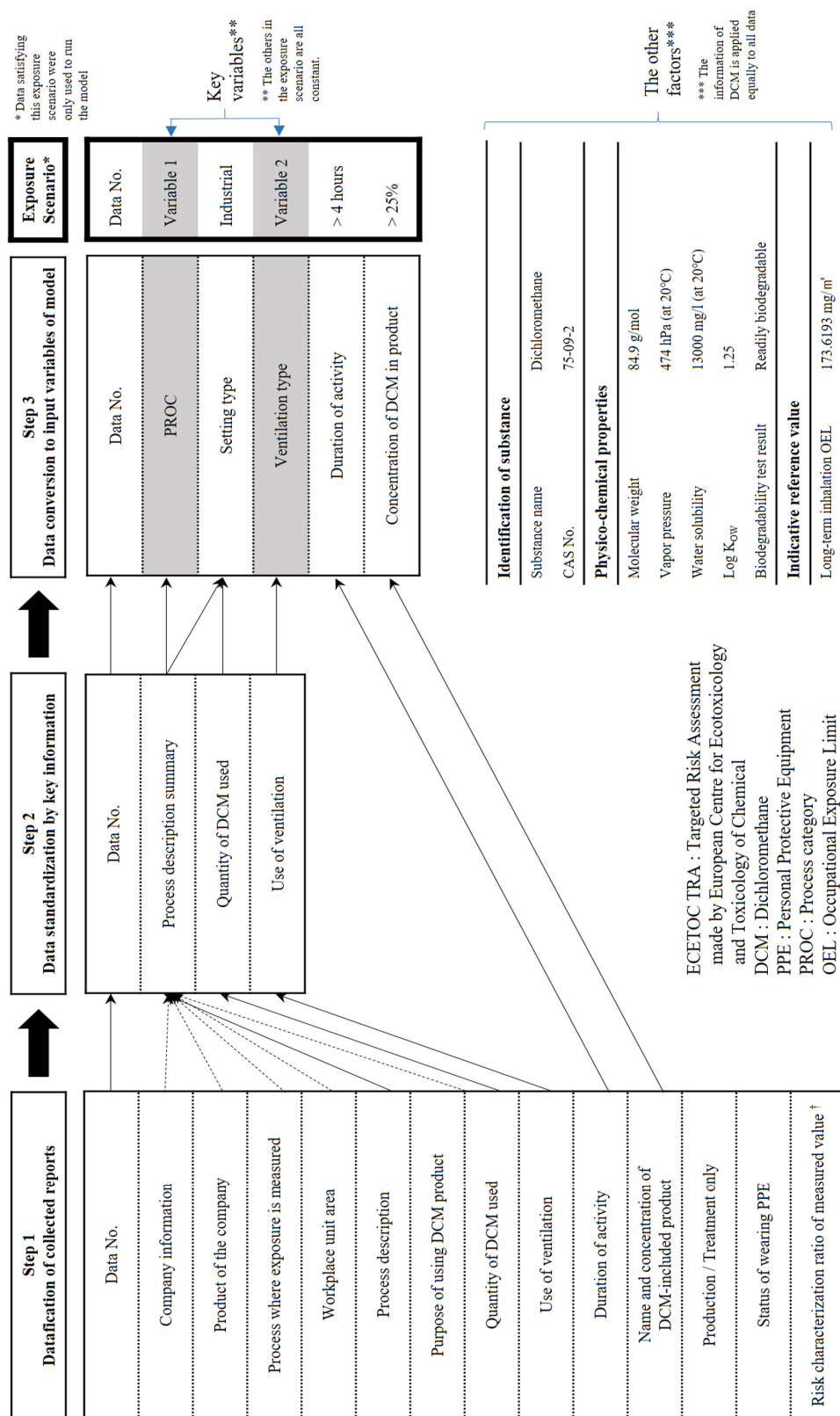


Figure 1. Flowchart for data collection and processing with the exposure scenario to run ECETOC TRA

Table 1. Data conversion into input variables to run ECETOC TRA

Variable	Step 2 (Data standardized by key information)	Step 3 (Input variables of ECETOC TRA)
PROC*	Use in closed equipment	PROC2
	Use in closed equipment and sometimes use in Manual operation to charge/discharge DCM	PROC3
	Use in the space in which DCM is gradually volatilized / Use to clean equipment / Unclassifiable how to use because of lack of information	PROC4
	Batch mixing or blending	PROC5
	Industrial spraying	PROC7
	Transfer of substance or preparation at non-dedicated facilities / automatic cleaning	PROC8a
	Transfer of substance or preparation at dedicated facilities	PROC8b
	Roller application or brushing	PROC10
	Treatment of product by dipping (with hoist) / cleaning product with ultrasonic machine	PROC13
	Use as laboratory reagent	PROC15
	Hand-mixing with intimate contact	PROC19
Ventilation type	With doors and windows open	Indoors with good GV [†] (ERR [‡] : 30%)
	With windows open	
	With LEV [§] installed	Indoors with LEV (ERR: 90–95%)
	With GV operated and LEV operated properly	
	Using enclosed machine	Indoors with LEV and good GV (ERR: 93–96.5%)
	With GV operated and LEV installed	
	Without LEV system	Indoors (ERR: 0%)
	With GV operated but LEV poorly installed	
Duration of activity	Without ventilation	Outdoors (ERR: 30%)
	Nothing written on the document about ventilation	
	Work outside or half-outside a building	> 4 hours
	Work over 4 hours a day	
	Work 1–4 hours a day	1–4 hours
Concentration of DCM in product	Work 15 minutes to 1 hour a day	15 mins to 1 hour
	Work less than 15 minutes a day	Less than 15 min
	Do not use product including DCM	No
	Less than 1% of DCM is included in the product	< 1%
	About 1–5% of DCM is included in the product	1–5%
	About 5–25% of DCM is included in the product	5–25%
	More than 25% of DCM is included in the product	> 25%

*PROC: process category

†GV: general ventilation

‡ERR: exposure reduction rate

§LEV: local exhaust ventilation

|| DCM: dichloromethane

세척조에 담금 작업으로 탈지 작업을 실시하고 있으며, 세척조 측방향에 환기설비가 설치되어 있고 유해인자의 기류가 후드쪽으로 보내지도록 선풍기가 설치되어 있음'이라고 기술되어 있는 경우, '세부 공정내용: 호이스트를 이용한 담금 작업 실시', '환기방식: 세척조에 국소 배기장치 설치 및 전체환기 실시'로 나눠 기재하여 자료를 데이터화하였다. 그리고 일부 측정값이 '불검출'로 기재된 자료는 공기 중 디클로로메탄이 노출기준만큼 존재한다고 가정했을 때의 농도($1736.2 \mu\text{g}/\text{sample}$)에 비해 검출한계($0.4 \mu\text{g}/\text{sample}$)가 현저히 낮은 수치에 해당하므로 디클로로메탄이 작업장에서 유해할 정도의 농도 수준으로 존재하지 않았을 것이라 판단하여 측정값을 '0'으로 처리하였다.

2) 2단계: 데이터 표준화

데이터 표준화 작업은 데이터화한 수집자료를 즉시 입력변수로 변환하게 될 때 발생할 수 있는 연구자의 주관 개입 등을 최대한 배제할 수 있도록 1단계와 3단계 사이에 데이터 표준화 작업을 실시하였다. 데이터 표준화를 위해 ECHA의 guidance와 ECETOC의 technical report에 서술된 내용을 기반으로 PROC과 환기방법의 문구 할당 기준을 결정하고, 나머지 입력 변수들에 대해서도 각각 세부기준을 세워 Table 1과 같이 각 기준에 해당하는 표준화 문구를 할당하였다 (ECHA, 2015b, ECETOC, 2018). 그리고 작업환경측정결과표와 작업환경측정 신뢰성평가 보고서에서 수집된 정보들을 주요 내용에 따라 미리 정해진 표준화된 문구 중 하나를 할당하였다. 예를 들어 모델 입력변수 중 하나인 공정범주(Process Category, PROC)는 1단계에서 세부 공정내용 항목(process description)을 중심으로 사업장 정보, 측정공정명, 단위작업장소, 사용 용도, 생산품 항목의 내용을 종합적으로 고려해서 2단계에서 임시공정명(process description summary) 항목에 값을 할당한다.

3) 3단계: 모델 입력변수화

3단계에서는 표준화된 각 항목값을 모델 실행에 필요한 입력변수로 변환하였다. 변환 대상 변수는 PROC, 세팅타입, 환기방법, 작업시간, 제품 내 디클로로메탄 함유량이다. 이 중 PROC과 환기방법 변수에는 2단계의 표준화된 데이터의 내용에 따라 적절한 입력변수 값을 Table 1과 같이 할당하였으며, 성상(고체 해당여부),

호흡기 보호구 효율, 피부 보호구 APF 값으로는 모두 해당없음(No)을 선택하였다. 그 외 변수는 노출시나리오를 설정하여 모든 데이터에 대해 동일한 값을 적용하였다.

3. 노출시나리오 설정

입력변수 중 물질의 정체성, 물리화학적 특성, 공정정보, 독성값(참고치)은 모든 데이터에 동일하게 적용하였다. 또한 모델의 주요변수이자 연구에서 관찰변수인 PROC과 환기방법이 결과값(모델값)에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 모델 실행 대상을 3단계까지 가공된 데이터 중 세팅타입, 작업시간, 제품 내 디클로로메탄의 농도가 특정값을 만족하는 데이터로 한정하였다. 이에 따라 모델 실행 대상이 되는 데이터는 514건(작업환경 측정 491건, 작업환경측정 신뢰성평가 23건)이었으며 각 입력변수의 지정된 입력값은 Figure 1과 같다.

4. ECETOC TRA 모델 실행

각 데이터에 대한 모델 실행 입력값으로 PROC과 환기방법을 제외한 모든 변수에 동일한 값을 적용하였다. 수집 데이터는 호흡기 노출만을 고려한 작업환경측정자료이기 때문에 모델 실행 결과값 중 장기흡입 노출위해도(long-term inhalation risk characterization ratio, long-term RCR)만을 모델값으로 채택하였다. 위해도(risk characterization ratio, RCR)는 모델에서 예측한 위해도를 디클로로메탄의 노출기준으로 나누어 산출된 값으로, 위해도가 1을 초과하면 해당 노출로 인한 유해효과가 나타날 가능성이 있다고 해석할 수 있다(ECETOC, 2004). 그리고 장기흡입 노출위해도는 8시간 노출 시 위해도를 의미하며 모델에서는 장기 노출 추정치(long-term exposure estimate)를 TWA로 나눈 값에 해당한다.

한편, 모델값과 비교할 수 있도록 작업환경측정 DB와 작업환경측정 신뢰성 평가 자료에서의 측정값을 '각 자료에 기재된 원(元)측정값을 디클로로메탄의 노출기준으로 나눈 값'으로 재정의하여 RCR 형식으로 나타내었으며, 모델값과 마찬가지로 값이 1을 초과하면 위해도가 높다고 표현하였다. 이처럼 위해도가 1에 가깝거나 그 이상인 경우 다음 단계의 위해도 평가(risk assessment)가 요구된다(ECHA, 2016). 한편, 측정값은 모두 8시간-시간가중평균노출수준(8hr-TWA)이어서 디클로로메탄의 노출기준은 50 ppm을 적용하였다.

5. 신뢰구간 계산

작업환경측정 DB와 작업환경측정 신뢰성평가의 신뢰구간은 다음과 같은 방법으로 산출하였다. 우선, 자료의 평균은 산술평균값(arithmetic mean)으로, 조건을 만족하는 데이터의 위해도를 데이터 수로 나누어서 값을 산출하였다(식1). 그리고 자료별 95% 신뢰구간(confidence interval)은 표본 표준편차(sample standard deviation)(식2)와 신뢰구간을 구하는 식을 이용하여 값을 산출하였다(식3).

$$(\text{arithmetic mean}) \bar{x} = \frac{\sum x}{n},$$

x: data, n: the number of data (1)

$$(\text{standard deviation}) s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}},$$

x: data, \bar{x} : arithmetic mean,
n: the number of data (2)

$$(95\% \text{ confidence interval}) CI = \bar{x} \pm 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}}$$

\bar{x} : arithmetic mean of sample,
s: standard deviation,
n: the number of data (3)

III. 연구결과

1) 공정범주

작업환경측정DB 586건의 업종은 한국표준산업분류상 금속 가공제품 제조업(161건), 자동차 및 트레일러 제조업(84건), 기타 기계 및 장비 제조업(66건), 전자 부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업(57건), 의료용 물질 및 의약품 제조업(34건), 화학 물질 및 화학제품 제조업(30건) 등이었고, 작업 내용은 담금 방식의 세척작업(98건), 가공제품 탈지(78건) 등 세척 공정이 많았다. 그리고 신뢰성평가 33건의 업종은 기타 기계 및 장비 제조업(7건), 화학 물질 및 화학제품 제조업(4건), 자동차 및 트레일러 제조업(3건), 의료용 물질 및 의약품 제조업(3건), 금속 가공제품 제조업(3건), 전자 부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업(3건) 등이었고, 작업 내용은 담금 방식의 세척 작업(6건), 초음파세척(5건) 등으로 작업환경측정DB와 마찬가지로 세

척 공정이 많았다. 디클로로메탄 제조·사용 공정은 PROC 2, 3, 4, 5, 7, 8a, 8b, 10, 13, 15, 19, 24로 총 12개의 PROC으로 분류되었으며 그 목록은 Table 1과 같다. 그 중 노출시나리오에 해당되는 데이터가 없었던 PROC15와 PROC24를 제외하고 모델을 실행한 결과, 두 자료는 공통적으로 PROC4, PROC13, PROC19에 해당하는 데이터가 많았다. PROC13은 담금 및 주입 방식으로 화학물질을 취급하는 경우 해당되는 공정범주이고, PROC19는 손과 상완이 화학물질에 접촉되는 수작업 시 해당되는 공정범주로 공정내용이 명확하기 때문에 데이터의 세부공정내용이 이와 같은 경우에 해당 PROC으로 할당하였다. 반면 PROC4는 노출이 발생할 우려가 있는 화학물질 생산 공정에 해당되는 공정범주여서 세부 공정내용이 미흡하게 기재되어 있는 데이터에 할당한 PROC이므로, 해당 PROC 내 데이터의 세부 공정내용이 명확하지 않다.

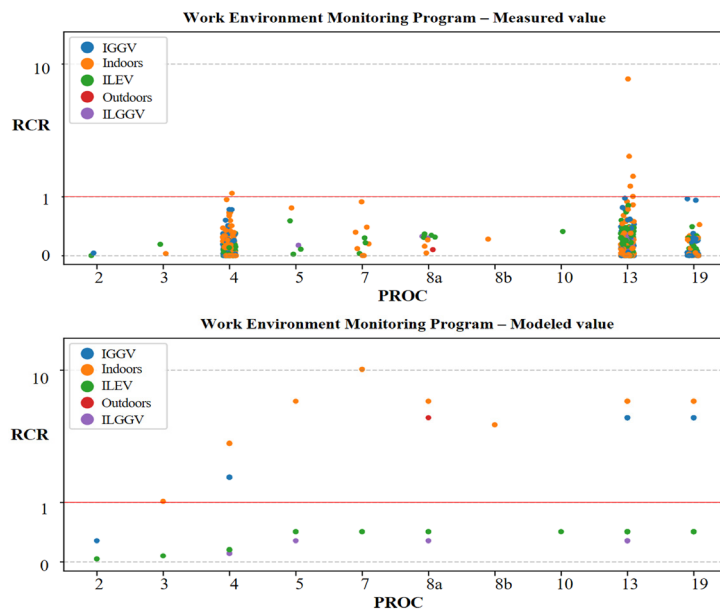
2) PROC별 데이터 분포

작업환경측정 데이터 491건의 PROC별 분포는 Figure 2와 같다. 측정값은 노출기준 초과 데이터가 6건(1.22%)이고, 노출기준 1/2 초과 데이터가 44건(8.96%)이었다. 반면, 모델값은 대부분의 데이터에서 위해도가 1을 초과하였다. 모델값은 각 데이터의 장기흡입 노출위해도를 표시한 것인데 그림에서 모델값 데이터의 수가 측정값에 비해 적은 이유는 데이터의 노출 시나리오가 동일하면 모델값이 동일하기 때문이다. 작업환경측정 신뢰성평가 데이터 23건의 측정값과 모델값의 PROC별 분포는 Figure 3와 같다. 측정값은 노출기준 초과 데이터가 4건(17.4%, PROC13 3건과 PROC19 1건)이고, 노출기준 1/2 초과 데이터가 10건(47.6%)이었다. 모델값의 경향도 측정값과 유사하게 나타났다.

작업환경측정 DB와 작업환경측정 신뢰성평가 자료의 측정값에 대한 평균은 Table 2와 같다. 측정값의 평균은 작업환경측정 DB는 0.232(95% 신뢰구간: 0.197~0.267)였고, 작업환경측정 신뢰성평가 자료는 0.739(95% 신뢰구간: 0.301~1.177)였다. PROC별 평균은 작업환경측정 데이터는 값이 모두 1 미만인 반면, 작업환경측정 신뢰성평가 데이터는 PROC13과 PROC19에서 각각 0.979, 1.546으로 높게 나타났다.

3) PROC 별 환기방법에 따른 데이터 분포

작업환경측정 DB의 경우 Figure 4에서 보는 것과



RCR: risk characterization ratio

ECETOC TRA: Targeted Risk Assessment made by European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical

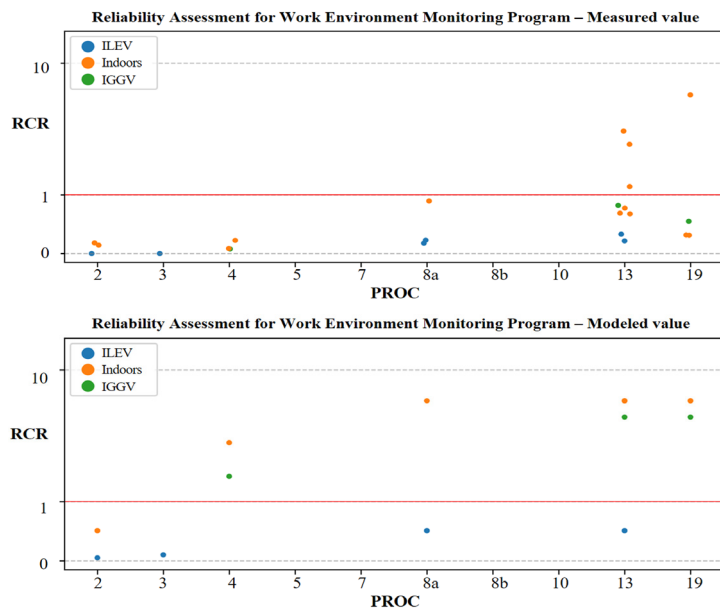
PROC: process category

ILEV: indoors with local exhaust ventilation

ILGGV: indoors with local exhaust ventilation and good general ventilation

IGGV: indoors with good general ventilation

Figure 2. RCR variation by PROC using ECETOC TRA with data obtained from work environment monitoring program



RCR: risk characterization ratio

ECETOC TRA: Targeted Risk Assessment made by European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical

PROC: process category

ILEV: indoors with local exhaust ventilation

IGGV: indoors with good general ventilation

Figure 3. RCR variation by PROC using ECETOC TRA with data obtained from reliability assessment for work environment monitoring program

Table 2. Data statistical analysis by data source

PROC*	WMP [†]				RA [‡] for WMP			
	N	AM	Min	Max	N	AM	Min	Max
PROC2	2	0.022	0.000	0.045	3	0.108	0.000	0.181
PROC3	2	0.113	0.035	0.191	1	0.000	0.000	0.000
PROC4	191	0.166	0.000	1.058	3	0.129	0.077	0.224
PROC5	5	0.341	0.024	0.808	0	–	–	–
PROC7	10	0.267	0.000	0.912	0	–	–	–
PROC8a	10	0.253	0.045	0.366	3	0.433	0.176	0.896
PROC8b	1	0.279	0.279	0.279	0	–	–	–
PROC10	1	0.410	0.410	0.410	0	–	–	–
PROC13	205	0.309	0.000	7.220	9	0.979	0.215	2.286
PROC19	64	0.172	0.000	0.963	4	1.546	0.312	5.008
Sum	491				23			
Average		0.232				0.739		
95% C.I. [§]			0.197 ~ 0.267				0.301 ~ 1.177	

– We divided the measured data by the occupational exposure value (OEL) of Dichloromethane (50 ppm)

*PROC: process category

[†]WMP: work environment monitoring program

[‡]RA: reliability assessment

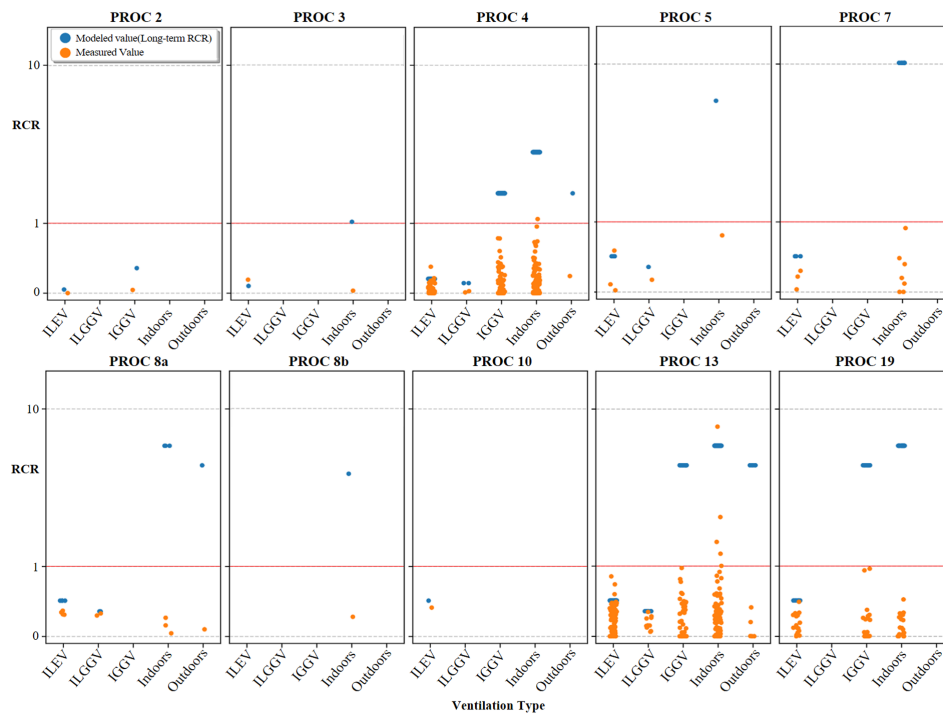
[§]C.I.: confidence interval

N: number of sample

AM: arithmetic mean

Min: minimum

Max: maximum



RCR: risk characterization ratio

ECETOC TRA: Targeted Risk Assessment made by European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical

PROC: process category

ILEV: indoors with local exhaust ventilation

ILGGV: indoors with local exhaust ventilation and good general ventilation

IGGV: indoors with good general ventilation

Figure 4. RCR comparison between measured value and modeled value using ECETOC TRA by PROC with data obtained from work environment monitoring program

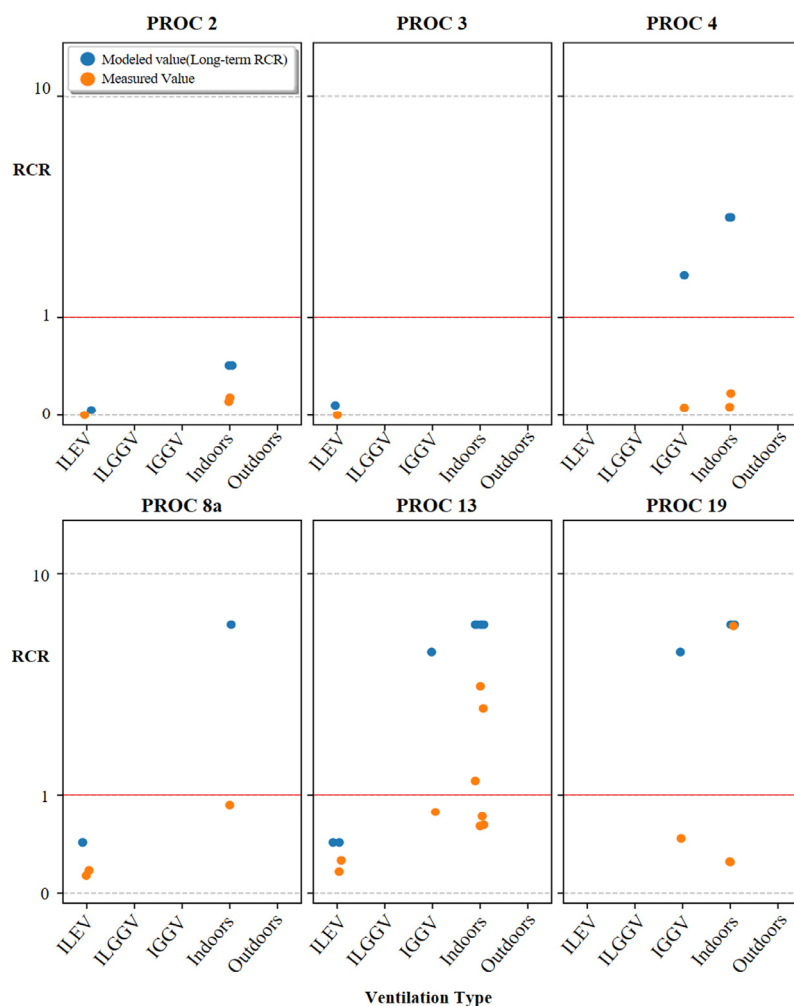
같이 환기방법에 따른 측정값과 모델값은 모든 PROC에서 서로 다른 경향성을 보였다. PROC7을 제외한 모든 PROC의 데이터에서, 환기방법이 같은 데이터 간 측정값의 변이는 큰 반면, 동일 PROC 내에서 환기방법이 다른 데이터 간에는 변이가 크지 않아 환기방법이 측정값에 영향을 미친다고 보기 어려웠다. 마찬가지로 측정값이 PROC에 따라 달라진다고 보기도 어려웠다.

한편 작업환경측정 신뢰성 평가 데이터의 각 PROC의 환기방법별 측정값과 모델값은 Figure 5와 같이 PROC13 등 대부분의 PROC에서 측정값과 모델값이

유사한 경향을 보였다.

4) 전체 PROC 및 환기방법별 모델값

이번 연구에서 설정된 노출시나리오에서 디클로로메탄의 PROC 및 환기방법별 모델값은 Figure 6과 같다. 장기흡입 위해도는 PROC2와 PROC3에서는 국소배기장치를 가동하거나 전체환기를 실시할 때에만 허용가능한 수준의 노출수준이 확보되었다. 그 외 PROC에서는 국소배기장치를 가동한 경우에만 허용가능한 위해도가 확보될 것으로 예측하였다.



RCR: risk characterization ratio

ECETOC TRA: Targeted Risk Assessment made by European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical

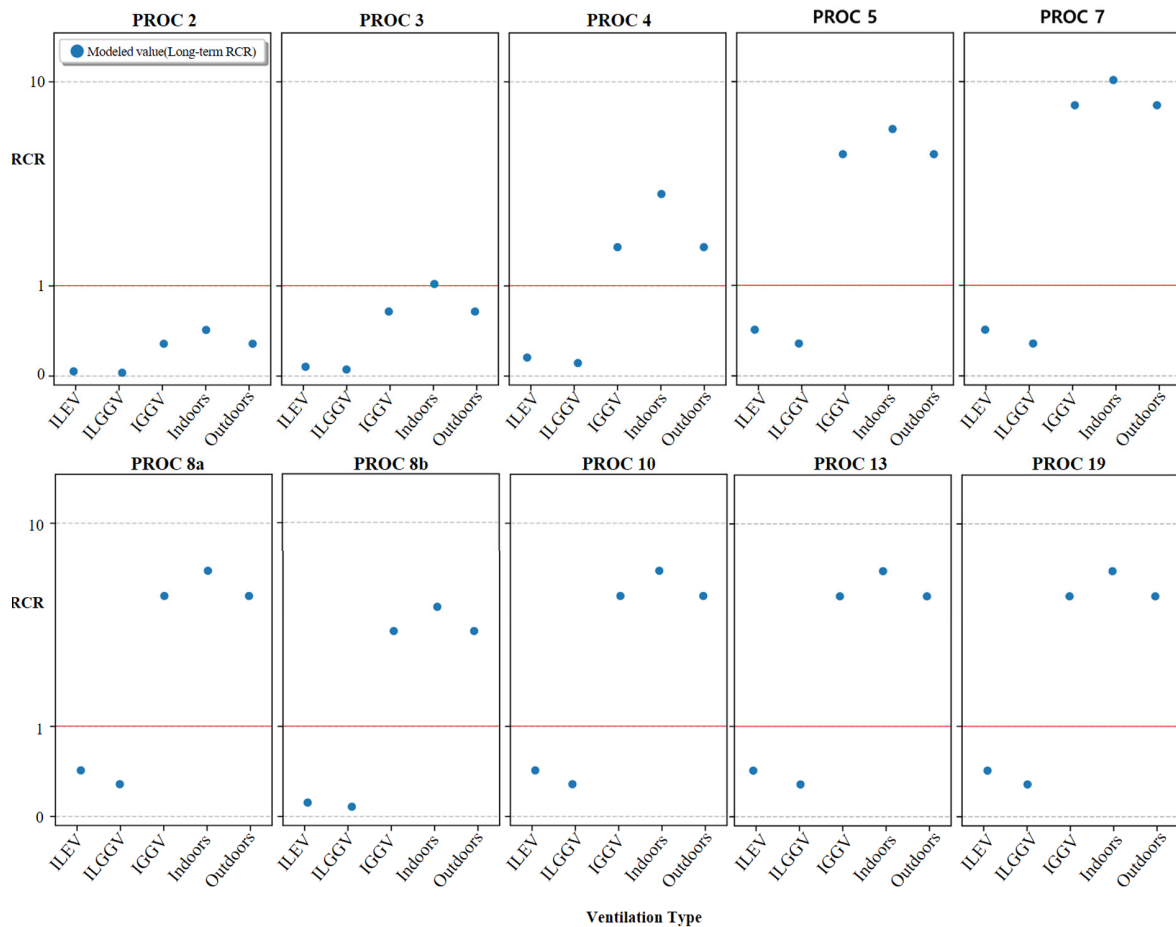
PROC: process category

ILEV: indoors with local exhaust ventilation

ILGGV: indoors with local exhaust ventilation and good general ventilation

IGGV: indoors with good general ventilation

Figure 5. RCR comparison between measured value and modeled value using ECETOC TRA by PROC with data obtained from reliability assessment for work environment monitoring program



RCR: risk characterization ratio

ECETOC TRA: Targeted Risk Assessment made by European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical

PROC: process category

ILEV: indoors with local exhaust ventilation

ILGGV: indoors with local exhaust ventilation and good general ventilation

IGGV: indoors with good general ventilation

Figure 6. Simulated results of RCR that varies depending on PROC and ventilation type using ECETOC TRA

5) 특이데이터

모델값과 측정값의 대소관계의 경우, 작업환경측정 신뢰성평가 자료에서는 모든 데이터의 모델값이 측정값보다 높았고 작업환경측정 DB에서는 전체 데이터 중 7건(1.43%)을 제외한 모든 데이터의 모델값이 측정값보다 높았다. 측정값이 모델값보다 높은 7건의 데이터(특이데이터)에 대하여 사업장 등에 연락하여 원인을 추가 조사한 결과는 Table 3과 같다. 추가 조사 결과, 7건 중 2건에 대해서만 원인 추정이 가능했고 나머지는 원인 파악이 불가능하거나 공정내용을 추가 파악할 수 없었다. 원인 추정이 가능했던 2건의 데이터는 근로자가 작업환경측정 결과표에 기재되지 않은 다른 공정범주의

업무를 병행한 점이 측정값이 모델값보다 높게 나타난 원인으로 추정된다.

IV. 결과 고찰 및 결론

1) 결과 고찰 및 결론

국내 작업환경측정제도와 같이 작업환경의 공기중 화학물질 농도를 직접 측정하여 근로자의 노출수준을 판단하는 방식은 숙련된 전문가가 규정된 절차와 방법에 따라 측정하고 분석한다면 최적의 결과를 낼 수 있다. 그러나 일부 화학물질의 측정방법 부재, 인적·물적 자원의 한계 등으로 인해 모델을 활용한 추정방식의 도입

Table 3. Additional analysis for unexpected data

Data No.	PROC* / Ventilation type	Analysis result	Description
[14]	PROC4 / ILEV [†]	— [‡]	• Impossible to get additional information about the process required to find a more accurate PROC for the data
[77]	PROC13 / Indoors	Unaccountable	• In the process, the grease of parts is removed with DCM [§] and any ventilation system is not installed. Unaccountable why the measured value is higher than the modeled value.
[120]	PROC13 / ILEV	Unaccountable	• In the process, some parts are coated with DCM the LEV system installed in the process works properly. Unaccountable why the measured value is higher than the modeled value.
[186]	PROC3 / ILEV	Assumable	• Actual exposure of the worker to DCM might be higher than expected because the equipment that worker uses to treat DCM was improperly sealed unlike to the document.
[259]	PROC4 / ILEV	—	• Refer to the description of data [14]
[323]	PROC5 / ILEV	Assumable	• Actual exposure of the worker to DCM might be higher than expected because the worker not only mix DCM but do carries out routine maintenance of the equipment.
[485]	PROC13 / ILEV	—	• Refer to the description of data [14]

*PROC: process category

†ILEV: Indoors with local exhaust ventilation

‡—: lack of information

§DCM: dichloromethane

||LEV: local exhaust ventilation

을 통해 노출수준 예측에 대한 정확도와 효율을 향상시킬 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 작업환경측정 및 신뢰성 평가 결과와 ECETOC TRA를 활용하여 국내 작업환경에서의 디클로로메탄 측정값 및 모델값의 경향성을 공정 범주별로 확인하였다.

연구 결과 디클로로메탄 제조·사용 공정은 총 12개의 PROC으로 분류되었고 이를 통해 국내 산업 현장에서 디클로로메탄이 취급되는 공정범주를 파악할 수 있었다. 그리고 모델실행 대상이 된 10개 PROC(2, 3, 4, 5, 7, 8a, 8b, 10, 13, 19)에 대해 모델을 실행한 결과, PROC2와 PROC13을 제외한 모든 PROC에서 국소배기장치를 가동한 조건에서만 모델값이 1 미만으로 예측되었다. 마찬가지로 작업환경측정 신뢰성평가 자료의 측정값은 환기방법이나 PROC에 따라 위해도가 달라지는 경향을 보였다. 반면, 작업환경측정 자료의 측정값은 환기방법에 관계없이 위해도가 유사하게 나타났으며 전체 데이터 중 1을 초과한 데이터는 6건(1.22%)에 지나지 않았다. 신뢰구간의 폭도 0.07로, 작업환경측정 신뢰성평가 자료의 신뢰구간의 폭인 0.876과는 차이가 있었다.

한편, 모델값과 측정값의 대소관계는 작업환경측정 신

뢰성평가 자료에서는 모든 데이터의 모델값이 측정값보다 높았고 작업환경측정 자료에서는 전체 데이터 중 7건(1.43%)을 제외한 모든 데이터의 모델값이 측정값보다 높았다. 이는 연구계획 수립 단계에서 tier-1인 ECETOC TRA 모델에 예상한 것과 동일한 결과였으며, 노출평가 대상 선정을 위한 사전검토(screening) 수단으로 ECETOC TRA 모델의 활용 가능성을 보여준다.

이처럼 사업장에서 실시한 작업환경측정결과와 측정값은 정부에서 실시한 신뢰성평가의 측정값 및 ECETOC TRA 모델값과 값의 경향이 달랐을 뿐 아니라 그 값이 나머지 값들에 비해 현저히 낮게 나타났다. 그렇기 때문에 작업환경측정을 통해 얻은 측정값을 국내 근로자의 노출수준으로 추가적인 검토 없이 그대로 사용한다면 국내 화학물질 제조·사용 사업장에 대한 안전보건관리는 작업환경측정 결과에 상당부분 의존하고 있기 때문에 잘못된 작업환경측정결과는 고위험 사업장의 관리부재로 이어질 수 있다. 예를 들면 작업환경측정 결과 측정값이 낮은 편에 속하는 사업장은 감독 또는 기술지원 대상에서 제외될 수 있다. 따라서 작업환경측정 결과를 보완할 수 있는 다른 노출평가 방법을 도입해야 할 필요가 있고, 해외에서 활발히 사용되고 있는 모델을 활용

하는 것이 하나의 해결책이 될 수 있다.

디클로로메탄은 산업안전보건규칙 별표12(관리대상 유해물질의 종류)에 의거한 관리대상 유해물질이다. 따라서 동 규칙 제422조(관리대상 유해물질과 관계되는 설비) 등의 조항에 따라 근로자가 실내 작업장에서 디클로로메탄을 취급하는 업무를 수행하는 경우, 그 작업장에 관리대상 유해물질의 증기 발산원을 밀폐하는 설비 또는 국소배기장치를 설치하여야 한다.

연구에서 살펴본 ECETOC TRA의 PROC별 모델값에 따르면 설정 노출시나리오와 같은 작업환경에서 디클로로메탄의 노출수준을 허용 가능한 수준으로 관리하려면 국소배기장치를 가동하여야 하는 것으로 나타났다. 국소배기장치를 단순히 설치하고 가동하는 것에서 더 나아가 의도된 목적이 달성될 수 있도록 국소배기장치를 적절하게 설계(design), 설치(install)하고 국소배기장치 성능이 적절하게 유지(maintain), 가동(operate)하는 것이 중요하다.

이러한 맥락에서 볼 때, 관계당국은 사업장의 작업환경을 평가할 때 국소배기장치의 설치 여부만 확인할 것이 아니라 국소배기장치가 적절한 위치와 형식으로 설치되었는지 여부에 대한 판단과 성능 확인을 위한 제어 풍속 측정을 반드시 병행하여야 한다.

그리고 연구의 한계를 극복하기 위해서는 작업환경측정 결과표에 공정별 작업방법과 환기 실태가 세부적으로 기재되어 있어야 한다. 이러한 화학물질을 취급하는 작업환경에 대한 정확한 정보와 실측값 확보는 tier 1 도구의 적용 목적을 달성하게 해주고 다음 단계(tier)의 위험성 평가 대상을 올바르게 설정하는 성공의 열쇠가 될 수 있다(ECETOC, 2004). 모델에 실제 작업환경과 동일한 조건을 부여해서 모델을 실행할 수 있을 때, 비로소 노출평가 모델값에 대한 실증적 연구가 가치를 발휘할 수 있기 때문이다.

이번 연구는 단일 화학물질인 디클로로메탄을 대상으로 이뤄졌지만 앞으로 다른 화학물질에 대해서도 추가 연구가 이뤄지고 그 결과 모델의 활용성이 추가적으로 검증된다면 국내에서도 모델을 활용한 작업환경의 노출 수준 추정이 가능할 것으로 보인다.

2) 제한점

첫째, 본 연구는 국내 디클로로메탄 취급 상황에서의 ECETOC TRA 모델의 적용 가능성을 살펴본 연구이므로 연구결과를 국외 사업장의 상황이나 디클로로메탄

의 다른 물질에 대해서 ECETOC TRA의 적용 가능성이 있는 것으로 일반화하기는 어렵다. 둘째, 본 연구는 작업환경측정 결과표와 작업환경측정 신뢰성평가 보고서의 정보를 수집 및 가공한 뒤 가공된 자료를 모델 입력값으로 넣어 ECETOC TRA를 실행한 것이므로 본 연구에서 데이터에 할당한 PROC 중 일부가 실제 작업 환경에는 적합하지 않을 수 있음을 고려하여야 한다. 예를 들어 디클로로메탄을 연구용으로 대량 취급 시에는 PROC15를 적용할 수 없기 때문에 세부공정 내용에 맞는 다른 PROC를 선택하여야 하나, 작업환경측정 DB 대부분에서 공정에 대한 자세한 서술 없이 '연구용'으로만 기재되어 있어 불가피하게 해당 데이터에 PROC4를 할당하였으므로 실제 공정에 가장 적합한 PROC은 이와 다를 수 있다. 마찬가지로 연구용은 아니지만 세부 공정내용 부재로 인해 PROC4를 할당한 데이터 역시 실제 작업장 공정에는 다른 PROC이 더 적합할 수 있다. 또한 PROC13을 할당한 데이터의 경우 실제 작업은 담금 방식의 세척 후 건조가 이뤄지며 건조 방법이 자연 건조, 에어건으로 건조 등 매우 다양하지만, 본 연구에서는 세척 후 건조방법의 차이에 따른 노출수준 차이는 고려하지 않고 주요 작업범위인 담금 방식의 세척에 따른 디클로로메탄 노출만 고려한 것이다.

References

- European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical (ECETOC). Targeted Risk Assessment (TRA) (Technical Report No. 93).; 2004. p. 22
- European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical (ECETOC). Version 3 Technical Report (TR): Background and Rationale for the Improvements (Public Notice: ECETOC TR114).; 2012. p. 8-11, 59-62
- European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical (ECETOC). Targeted Risk Assessment (TRA) Technical Report (TR): Further Explanation of the Technical Basis of the TRA v3.1 (Public Notice: ECETOC TR131).; 2018. p. 4-5
- European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical (ECETOC). Targeted Risk Assessment (TRA) User Guide for the integrated tool TRAM Version 3 update to version 3.1.; June 2017. p. 8-9
- European Chemicals Agency (ECHA). Guidance for Human Health Risk Assessment. Volume III Human Health, Part B Risk Assessment Draft Version 2.0

- (May 2015).; 2015. p. 31
- European Chemicals Agency (ECHA). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment, Chapter R.12: Use description, Version 3.0 (December 2015).; 2015. p. 49-54
- European Chemicals Agency (ECHA). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment. Chapter R.14: Occupational exposure assessment, Version 3.0 (August 2016).; 2016. p. 37, 38, 54
- European Chemicals Agency (ECHA). Guidance on the Biocidal Products Regulation, Volume III Human Health - Assessment & Evaluation (Parts B+C), Version 4.0 (December 2017).; 2017. p. 194
- Kang SK. Chemical poisoning, how to prevent it? - inform PROPER chemical information to workers, Comment on Safety and Health, Korea Enterprises Federation (KEF) No. 2007-5.; 2007. Available from: URL: http://www.kefplaza.com/labor/labor_print.jsp?nodeId=181&idx=4484
- Kim KE, Kim JW, Jeon HP, Kim SH, Cheong YS. Enhancement of Occupational Exposure Assessment in Korea through the Evaluation of ECETOC TRA according to PROCs. J Environ Health Sci. 2019; 45(2): 173-185
- Kim W, Kim SB, Cho JH, Choi IJ, Lee YG. The study on the regulation for restriction on hazardous substances in industrial products to manage unacceptable risk. Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency). 2019.
- Lee NR, Cho JH, Yu BW, Lee IS. Research on Regulatory Policy in Governments and Management Scheme in Company of Chemicals to protect Workers from Hazardous Chemicals. Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency). 2019.
- Ministry of Employment and Labor (MoEL). Public Notice concerning Exposure Limits for Chemicals and Physical Agents (MoEL Public Notice No. 2018-62).; 2018.
- Moon JS, Ock JW, Jung UH, Ra JS, Kim KT. 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(5): 460-467
- Schlueter U, Tischer M. Validity of Tier 1 Modelling Tools and Impacts on Exposure Assessments within REACH Registrations—ETEAM Project, Validation Studies and Consequences. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020; 17(12), 4589

<저자정보>

정수진(과장), 배계완(안전보건사업이사), 이나루(화학물질 연구센터 소장)