메탄올 작업장 노출 평가에의 EU REACH 프로토콜 적용: Targeted Risk Assessment

나진성 , 송문환 , 최은경*

한국생산기술연구원 환경규제기술센터

The Application of an EU REACH Protocol to the Occupational Exposure Assessment of Methanol: Targeted Risk Assessment

Jin-Sung Ra, Moon Hwan Song, and Eun Kyung Choe*

Regulatory Chemical Analysis and Risk Assessment Center, Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

Background: The European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals' Targeted Risk Assessment (ECETOC TRA) tool has been recognized by EU REACH as a preferred approach for calculating worker health risks from chemicals.

Objectives: The applicability of the ECETOC TRA to occupational exposure estimation from industrial uses of methanol was studied by inputting surveyed and varied parameters for TRA estimation as well as through comparison with measured data.

Methods: Information on uses of methanol was collected from seven working environment monitoring reports along with the measured exposure data. Input parameters for TRA estimation such as operating conditions (OCs), risk management measures (RMMs) and process categories (PROCs) were surveyed. To compare with measured exposures, parameters from the surveyed conditions of ventilation but no use of respiratory protection were applied.

Results: PROCs 4, 5, 8a, 10, and 15 were assigned to ten uses of methanol. The uses include as a solvent for manufacturing sun cream, surfactants, dyestuffs, films and adhesives. Methanol was also used as a component in a release agent, hardening media and mold wash for cast products as well as a component of hard-coating solution and a viscosity-controlling agent for manufacturing glass lenses. PROC 8a and PROC 10 of a cast product manufacturer without LEV (local exhaust ventilation) and general ventilation as well as no respiratory protection resulted in the highest exposure to methanol. Assuming the identical worst OCs and RMMs for all uses, exposures from PROC 5, 8a, and 10 were the same and the highest followed by PROC 4 and 15. The estimation resulted in higher exposures in nine uses except one use where measured exposure approximated exposures without RMMs.

Conclusions: The role of ECETOC TRA as a conservative exposure assessment tool was confirmed by comparison with measured data. Moreover, it can guide which RMMs should be applied for the safe use of methanol.

Key words: ECETOC TRA, process category, risk management measure, use of methyl alcohol, worker (occupational) exposure assessment

Received October 8, 2021

Revised October 20, 2021

Accepted October 20, 2021

Highlights:

- Methanol uses were categorized with PROC 4, 5, 8a, 10 and 15 by use descriptor system.
- Monitoring data showed lower exposure concentration compared with ECETOC-TRA estimates.
- The conservatism of the ECETOC-TRA was valid in Korean industry with methanol use.

*Corresponding author:

Regulatory Chemical Analysis and Risk Assessment Center, Korea Institute of Industrial Technology, 143 Hanggaui-ro, Sangrok-gu, Ansan 15588, Republic of Korea

Tel: +82-31-8040-6211

Fax: +82-31-8040-6210

E-mail: ekchoe@kitech.re.kr

I. 서 론

화학물질의 생태독성 및 인체독성을 연구하는 대표적인 유럽기관인 European Centre for Ecotoxicology and Toxicology

of Chemicals (ECETOC)에서 개발한 ECETOC Targeted Risk Assessment (TRA) 틀은 화학물질이 작업자, 소비자 및 환경에 노출되어 야기하는 위해성에 대해 계산하는 Tier I 틀이며, 2007년 유럽의 Registration, Evaluation, Authorisation and

Restriction of Chemicals (REACH)가 시행되면서, 전세계적으로 소비자 및 작업자 노출을 평가함에 있어서 선호하는 방법으로 부각되어 왔다.¹⁻¹⁴⁾ ECETOC TRA는 2004년에 처음 소개된 후 2010년 REACH 1차 등록을 앞두고 2009년 TRAv2가 발간되었고, 이후 ECETOC은 European Chemicals Agency (ECHA)와 협력하여 REACH 1차 등록에서 축적한 경험으로 기본 골격 안에서 툴의 정확도와 유용성을 향상한 TRAv3을 2011년 발표하였고, 개선된 TRAv3는 ECHA에서 공식 제공한 Chemical Safety Assessment and Reporting Tool (CHESAR) v2에 정돈되어 REACH 등록을 완성하는데 사용되었고 현재 최신 버전은 TRAv3.1이다.^{1,2)}

툴의 개발자 및 연구자들은 지속적으로 툴의 유효성과 한계에 대해 주기적으로 점검하고 있으며, 존재하는 작업자 노출 측정(worker exposure measurements) 데이터가 현장에서의 참(true) 값을 나타낸다는 가정 하에 검증 연구가 이루어지고 있으나 기존의 많은 데이터가 측정 배경에 대한 정보가 부족한 경우가 많아서 비교 시 주의를 해야 한다.³⁾ 노출평가 툴에 의한 작업자 노출 예측 능력의 검증에 대한 연구는 유기용매에 대한 폴란드 작업환경측정값과 ECETOC TRA 노출 예측값의 비교,⁴⁾ 고체상 물질(석영)과 액체상 물질의 국내 작업환경측정값과 ECETOC TRA 노출 예측값의 비교,⁵⁾ 측정값과 예측값 비교로부터 국내 산업현장에 맞는 자체적인 새 Process Category (PROC)의 도입 필요성,⁶⁾ 작업자 노출 평가 툴(ECETOC TRA v.3.1, Stoffenmanager v.6 혹은 v7, ART v.1.5)을 사용한 유기용매 및 농약 노출 예측 비교,^{7,8)} 미국 18개 작업장에서 수집된 53개 노출시나리오에 대해 개인장구로 포집된 293개 샘플의 측정값과 ECETOC TRA v2, v3 등 5개 노출평가 툴의 노출 예측 비교,⁹⁾ 일본 17개 회사의 137개 공정에 대한 에틸벤젠의 노출 측정값과 ECETOC TRA 예측값 비교,¹⁰⁾ 그리고 벤젠 노출 평가를 통한 ECETOC TRA 및 Stoffenmanager의 화평법 적용성을¹¹⁾ 포함하여 여러 연구가 보고되어 있다.^{3,12,13)} 그러나, 물질과 PROC의 모든 가능한 조합에 대한 TRA 산출 능력에 대해서는 아직 충분히 평가되지 않았고, 공정 변수인 PROC 간에 노출값의 정량적인 관계가 없으므로 서로 다른 많은 노출 상황을 커버해야 TRA의 완전한 검증에 도달할 수 있는데 이에 가까운 연구는 아직 보고되지 않고 있다.³⁾

그럼에도 불구하고, REACH 및 화평법과 같은 화학물질 위해관리의 이행 시, 노출시나리오 모든 경우에 직접 측정이 거의 불가능한 상황에서 ECETOC TRA와 같은 Tier I 스크리닝 툴은 필수적이며, 따라서, TRA의 입력 및 출력 결과를 이해하고 툴을 정확히 사용하는 것이 요구된다. ECETOC TRA는 국내 화평법에서 규정한 위해성 자료 작성을 위한 노출평가 중 작업자와 소비자 노출량 산정을 위해 활용되는 툴이기도 하다.^{14,15)}

근로자가 호흡하는 공기 중의 유해물질 종류 및 농도를 파악하여 해당 작업장에서 일하는 동안 건강 장애를 유발하지 않도록

시료를 채취 및 분석하여 평가하는 것을 작업환경측정이라 하는데 산업안전보건법 법률 제3532호 제31조(작업환경등의 측정)에 법적 근거를 갖고 1982년 7월부터 시행되어 왔다.¹⁶⁾ 따라서, 작업환경측정 자료가 축적되어 있다.

본 논문에서는 국내 제도적 활용을 위해 도입된 ECETOC TRA의 작업장 적용 신뢰성을 검토하고자 한다. 확보한 작업환경측정 자료로부터 제일 다양하게 사용된 메탄올의 산업적 용도를 사례로 ECETOC TRA를 활용하여 용도별 메탄올 노출을 예측하고 작업환경측정값과 비교해 보기로 한다. 또한 목적에 맞는 노출 예측을 위한 ECETOC TRA 3.1의 입력 변수를 파악해 보고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 메탄올의 작업장 용도 사례 조사 및 작업장 노출 측정값 확보

작업환경측정 대상 유해인자 메탄올(CAS 67-56-1)을 대상으로 시행한 7개 사업장 작업환경측정(working environment monitoring) 결과(2019년 자료)를 사업장의 공정정보와 연계하여 확보하였다. 작업환경측정 원칙, 시료채취의 위치, 측정 시간, 시료채취 근로자수 등은 작업환경측정 및 정도관리 등에 관한 고시(고용노동부고시 제2017-27호)에 근거하여 수행되며, 작업장의 메탄올은 KOSHA 지침서 A-117-2014(두 개의 Anasorb 747 튜브에 포집하여 50/50 (v/v) 이산화탄소와 디메틸포름아미드 용액으로 추출 후 gas chromatograph/flame ionization detector (GC/FID)에 의해 측정되었고,¹⁷⁾ 개인시료채취 방법에 의해 작업장의 공정별 2개 시료를 측정된 자료를 확보하였다.

2. ECETOC TRA를 사용한 예측 노출량 산출

ECETOC 홈페이지를 통해 2017년 업데이트 된 엑셀 형식의 ECETOC TRA v.3.1 통합 툴(integrated tool)을 다운로드 후 설치(압축풀기 실행)하였다.¹⁸⁾ 작업자 노출평가 구동 시 필요한 Step 1 (identification of substances) 및 Step 2 (physical-chemical properties), Step 3a의 작업자 평가(worker assessment)를 사용자 인터페이스(user interface)에 입력을 해야 작업자 노출량이 산출된다. 한편, ECETOC-TRA 툴의 데이터 시트는 20개의 datasheets 구성되어 있고, 각 데이터 시트는 4개 물질이 적용 가능하며 1개의 물질 당 60개의 시나리오를 입력 및 저장할 수 있다. 데이터 시트 입력 방식은 사용자 인터페이스와 동일한 방식으로 구성되어 있고, 사용자 인터페이스와 상호 연동되어 데이터 시트에 저장된 물질을 읽거나(사용자 인터페이스의 "Read" 버튼 실행) 사용자 인터페이스에서 입력한 데이터를 데이터 시트에 저장("Save" 버튼 실행)할 수 있다. 본 연구 목적을 위해 20개의 datasheets 중 1개의 데이터 시트에 메탄올 1종

물질을 대상으로 총 31개의 시나리오를 입력하여 저장 후 사용자 인터페이스에서 “Read” 버튼을 실행하여 읽은 후 배치 구동 (“Run batch” 버튼 실행) 하여 작업자 노출 예측 값을 계산하였다.

Step 1 및 2에 필요한 메탄올의 입력 정보는 Table 1과 같으며, ECHA 홈페이지의 Registered Substance Factsheets 및 National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)의 구축 자료로부터 조사하였다.^{19,20)} 작업자 노출 평가를 위한 입력 변수(input parameter)는 7개 항목으로서, 각 항목별로 선택을 하도록 되어 있고 몇 가지로 어떤 선택이 가능한 지를 표로 정리한 후(Table 2), 조사된 각 메탄올 용도별로 해당 공정의 PROC 및 입력 변수별 현장 상황에 맞게 최적으로 선택할 수 있도록 해당 작업장을 대상으로 조사하였다(Table 3, 4).

3. ECETOC TRA 구동 절차

ECETOC TRA 구동은 세 가지 결과를 볼 수 있도록 각각 다른 입력 변수를 넣어 수행하였다(Fig. 1). 현장에서 작업자에게 노출되는 메탄올을 예측하기 위하여 매칭된 PROC과 현장 작업 조건인 Operating Condition (OC) 및 Risk Management Measure (RMM)을 입력하여 구동하였고(Table 3, Fig. 1-①), 동일한 작업조건에서 PROC별 노출량을 비교하기 위해 현장에서 조사된 PROC에 임의의 동일한 최악의 OC 및 RMM (작업시간: >4시간, 혼합물 조성비: No, 배기장치 및 환기 여부: Indoors, 호흡기 보호구 적용: No, 피부 보호구 적용: No)을 가정하여 구동하였다(Fig. 1-②). 메탄올의 작업장 측정 결과값과 노출 예측값을 비교하기 위하여 현장 작업 조건인 OC 및 RMM을 입력하되, 작업장에 있는 작업자의 보호장비 밖에서 시료가 포집되므로, 개인 흡입 보호장비는 없는 조건으로 구동하였다(Fig. 1-③).

III. 결 과

1. 메탄올의 작업장 용도 조사 결과

메탄올은 화학적 인자 중 유기화합물 113종에 해당하므로,²¹⁾ 이에 대한 작업환경측정 자료가 존재했으며 Fig. 2는 작업환경측정 보고서로부터 확인된 메탄올의 7개 작업장(제조회사)에서의 산업적 용도이다. 자외선 차단제 크림, 계면활성제, 염료, 실리콘 이형코팅 필름, 우레탄 및 접착제의 제조에 원료(용매)로 사용되며, 주물품 제조 시 이형제, 도형제 및 경화제의 성분으로 사용되고, 안경 제조 시에 하드코팅액의 성분 및 점도조절제로서의 사용을 포함하여 총 10개 용도를 확인하였다. 작업장 1~5에서는 각 한 개 공정에서 사용되었고, 작업장 6에서는 세 개 공정에 사용되었고 작업장 7에서는 같은 공정에서 용도가 다른 2개 화학약품으로 사용되었다(Fig. 2).

메탄올은 화장품 제조회사에서 자외선 차단제 크림을 제조하는데 원료로 사용되며, 투입/반응(여과)/건조 작업을 하는데 간헐적인 노출이 있는 회분 또는 합성 공정에 해당하여 공정 범주 PROC 4와 매칭할 수 있다. 계면활성제 제조회사의 연구실에서도 연구개발용으로 사용되고 있음을 확인하였고 공정 범주는 PROC 15로 매칭할 수 있다. 염료 제조회사에서의 메탄올 사용은 염료제조의 원료로 사용하면서 대상 공정은 작업자가 원료를 투입하여 합성하는 공정으로 간헐적인 노출이 있는 회분 또는 합성 공정에 해당하여 PROC 4로 매칭하였다.

실리콘 이형코팅 필름이란 폴리에스테르 필름의 일면 또는 양면에 실리콘 이형제를 도포하여 이형층을 형성하여 접착면 보호용 필름 등으로 사용된다.²²⁾ 이 제품의 제조회사에서 실리콘 코팅 공정에서의 메탄올은 원료로 사용되는데, 개방된 회분 공정에서의 혼합 또는 분산 공정에 해당하여 PROC 5로 매칭하였다.

우레탄/접착제 제조회사에서의 용도는 원료(메탄올)를 일정

Table 1. Information of methanol for human health assessment and reference values^{19,20)}

Substance		Physical-chemical properties of substances-minimum input for human health assessment		Reference values for toxicity					
				ECHA DNELs*					OSHA PEL/NIOSH REL as TWA*
Name	Cas no.	Molecular weight (g · mol ⁻¹)	Vapour pressure (Pa)	Long-term inhalation-workers (ppm for volatiles)	Long-term inhalation-workers (mg · m ⁻³)	Long-term dermal-workers (mg · kg ⁻¹ day ⁻¹)	Short-term inhalation-workers (mg · m ⁻³)	Local dermal-workers (μg · cm ⁻²)	Long-term inhalation-workers (ppm/mg · m ⁻³)
Methyl alcohol	67-56-1	32.04	16,932	97.5	130	20	130	-	200/260

*DNELs: Derived No Effect Levels, PEL: Permissible Exposure Limit, REL: Recommended Exposure limit, TWA: Time Weighted Average, ECHA: European Chemicals Agency, OSHA: Occupational Safety and Health Administration, NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

Table 2. Input parameters for worker health assessment using ECETOC TRA and available selections for each parameter^{2,18)}

Input parameters	Process category (PROC)	Type of setting	Is substance a solid?	Dustiness of solid or vapor pressure of volatiles at process temp	Duration of activity (h/d)	Use of ventilation	Use of respiratory protection	Substance in preparation?	Dermal PPE*/Gloves
Options [†]									
	PROC 1~7	Industrial	Yes	Low	>4 hours	Outdoors	No	No [‡] (Not in a mixture)	No
	PROC 8a,8b								
	PROC 9~21	Professional	No	Medium	1~4 hours	Indoors	90%	<1%	Gloves APF* 5,
	PROC								
	22a,22b,22c			High	15 min to 1 hour	Indoors with LEV*	95%	1~5%	Gloves APF 10,
	PROC								
	23a,23b,23c				less than 15 min	Indoors with good general ventilation		5~25%	Gloves APF 20 (for industrial)
	PROC								
	24a,24b,24c					Indoors with enhanced general ventilation		>25%	
	PROC								
	25a,25b,25c								
	(PROC 7 and 22 always for industrial/PROC 11 and 20 always for professional)					Indoors with LEV and good general ventilation			

*PPE: Personal Protective Equipment, LEV: Local Exhaust Ventilation, APF: Assigned Protection Factor.

[†]Each parameter has several options. For examples, duration of activity has 4 options.[‡]The option "No" means 100%.

Table 3. Input parameters for exposure estimation of methanol in seven workplaces and resulting worker exposures
Input parameters from the survey on seven workplaces

Work places	Process categories	Operation conditions		Risk management measures			Estimation of worker exposures using ECETOC-TRA				
		Duration of activity (h/d)	Use of ventilation	Use of respiratory protection	Substance in preparation	Dermal PPE/Gloves	Long-term inhalation (ppm for volatiles)	Long-term inhalation (mg/m ³)	Long-term dermal exposure (mg/kg/day)	Short-term inhalation (mg/m ³)	Local dermal exposure (μg/cm ²)
1	PROC 4	>4 (10)*	Indoors with LEV	No	No	No	10	13.35	6.86	53.40	1,000
2	PROC 15	>4 (8)	Indoors with LEV & general ventilation	90% [†]	No	No	0.35	0.47	0.34	1.87	100
3	PROC 4	>4 (8)	Indoors with LEV	No	No	No	10	13.35	6.86	53.40	1,000
4	PROC 5	>4 (10)	Indoors with LEV & general ventilation	90% [†]	No	No	1.75	2.34	13.71	9.35	2,000
5	PROC 4	>4 (8)	Indoors with LEV & general ventilation	No	No	No	7	9.35	6.86	37.38	1,000
6-1	PROC 8a	>4 (10)	Indoors	No	1~5% (1%)*	No	50	66.75	2.74	267	200
6-2	PROC 8a	>4 (10)	Indoors	No	>25% (33%)	No	250	333.75	13.71	1,335	1,000
6-3	PROC 10	>4 (10)	Indoors	No	>25% (45%)	No	250	333.75	27.43	1,335	2,000
7-1	PROC 8a	>4 (8)	Indoors with LEV	No	5~25% (20%)	No	15	20.03	8.23	80.10	600
7-2	PROC 8a	>4 (8)	Indoors with LEV	No	No (100%)	No	25	33.38	13.71	133.5	1,000

*According to the surveyed duration and concentration in parentheses, the corresponding parameter options of ECETOC TRA were selected.

[†]Efficiency of respiratory protection was regarded as 90%.

Table 4. Input parameters for exposure estimation of methanol in seven workplaces and resulting worker exposures
Input parameters for comparison with measured exposures

Work places	Process Categories	Operation conditions Duration of activity (h/d)	Risk management measures				Worker exposures	
			Use of ventilation	Use of respiratory protection	Substance in preparation	Dermal PPE [§] /Gloves	Long-term inhalation (ppm for volatiles)	Worker exposures measured [†] (ppm for volatiles)
1	PROC 4	>4 (10)*	Indoors with LEV [§]	No	No	No	10	<0.016 [†]
2	PROC 15	>4 (8)	Indoors with LEV & general ventilation	No	No	No	3.5	<0.002 [†]
3	PROC 4	>4 (8)	Indoors with LEV	No	No	No	10	3.78/5.71
4	PROC 5	>4 (10)	Indoors with LEV & general ventilation	No	No	No	17.5	<0.325 [†]
5	PROC 4	>4 (8)	Indoors with LEV & general ventilation	No	No	No	7	84.12/119.06
6-1	PROC 8a	>4 (10)	Indoors	No	1~5% (1%)*	No	50	13.44/26.84
6-2	PROC 8a	>4 (10)	Indoors	No	>25% (33%)	No	250	16.45/24.52
6-3	PROC 10	>4 (10)	Indoors	No	>25% (45%)	No	250	24.79/45.44
7-1	PROC 8a	>4 (8)	Indoors with LEV	No	5~25% (20%)	No	15	<0.438 [†]
7-2	PROC 8a	>4 (8)	Indoors with LEV	No	No (100%)	No	25	

*According to the surveyed duration and concentration in parentheses, the corresponding parameter options of ECETOC TRA were selected.

[†]All measurements were carried out in duplicate.

[‡]Limit of Detection (LOD) was presented. LOD varied because of different dilution factors of four testing laboratories.

[§]LEV: Local Exhaust Ventilation, PPE: Personal Protective Equipment.

Fig. 1. Flow chart for worker exposure assessment of methanol and comparison of its estimated and measured exposures from various industrial uses

비율에 맞게 용기에 넣고 혼합하여 포장하는 공정으로, 교반기에서 자동 배합작업이 진행되지만 용제를 투입하고 소분할 때 작업자가 직접 수작업으로 진행하고 있어 PROC 4로 매칭하였다.

메탄올은 주물공장에서 발생가능한 가스상 유해인자에 속하며,²³⁾ 주물공장에서는 금속표준용어집에 의하면 중자(core), 조형(molding), 합형(mold assembly), 도형제(mold wash), 이형제(release or parting agent) 등의 용어를 사용한다.^{24,25)} 본 논문에서 대상으로 한 주물품 제조회사는 다양한 화학제품을 사용하여 원료입고-용해-콜드박스(자동중자)-조형-합형/도형-주입-탈형-샷트-검사/출고의 공정을 통해 주물품을 생산하는 사업장이었다. 메탄올은 콜드박스(CO₂ 중자조형)를 이용한 중자 공정에서 이형제의 성분으로 사용되고, 조형 공정에서는 경화제의 성분으로 사용되며, 합형 공정에서는 도형제의 성분으로 사용되어 작업자에 노출될 수 있음을 확인하였다. 이형제는 주형(mold)의 기공을 코팅하여, 주형과 모형(pattern)사이에서 막을 형성하여 달라붙지 않고 쉽게 분리되도록 하는 화학약제이며 모형에 충실한 주형을 얻을 수 있어 정밀한 주조품을 형성할 수 있다.^{25,26)} 도형제는 완성된 주형이 깨지거나 떨어지지 않게 하고 또한 좋은 주물 표면을 얻기 위해 사용하는데, 주형 및 중자 표면의 모래 기공을 충전하고 모래와 주물을 잘 떨어지게 하여

주물품 표면 품질을 향상시킨다. 도형제의 주성분은 탄소, 흑연, 실리카 등이며 용제는 메탄올, 에탄올, 물 등이 사용된다.²⁷⁾ 주물품에 공동부와 구멍을 만들고자 할 때, 이에 해당하는 부분에 용탕이 들어가지 않게 하기 위해 주형 속에 삽입되는 사형을 중자라고 하는데, 중자공정에는 고비용의 불편한 고온 큐어링 시스템을 대신하여 콜드박스(cold box) 시스템을 많이 사용하고 있다.²⁸⁾ 중자공정은 주물품 내부구조용 모형을 제작하는 공정이고, 조형공정은 췌물을 투입하기 위한 틀을 만드는 공정인데, 두 개 공정 모두 비고정형 저장용기에 저장 또는 저장 용기로부터 이송, 운반하는 작업에 해당되어 PROC 8a로 매칭하였다. 합형 공정은 제작된 틀의 상판과 하판을 붙이고 완성된 틀과 용융금속과 접촉하는 부분에 내화성 물질을 도포하는 공정으로 상·하판 접착 시 사용되는 도형제에 함유된 메탄올이 노출될 수 있다. 이 공정은 합형 전에 알콜성 도형제를 모형에 붓으로 칠하는 공정이므로 PROC 10으로 매칭하였다.

안경의 플라스틱 렌즈는 유리 렌즈보다 가벼운 반면 표면의 강도가 약하여 하드코팅이 필요하고,²⁹⁾ 코팅 시 조성물의 점도 및 유동성을 조절하고 지지 기재에 대한 조성물의 도포성을 높이기 위하여 선택적으로 유기 용매를 포함한다. 안경렌즈 제조회사에서 하드코팅 공정에서 메탄올은 하드액 성분과 점도조절제 용도로 사용되는데, 이에 사용가능한 용매 중 알코올계

Substance : Methyl Alcohol			
Workplaces	Uses	Process Categories	Operation Conditions & Risk Management Measures
1 Cosmetic Manufacturer	As a solvent for manufacturing sun cream	PROC 4 Chemical production where opportunity for exposure arises	Industrial / No solid / 10 h/d / Indoors with LEV / Without general ventilation / No respiratory protection / No preparation / No dermal PPE-Gloves
2 Surfactant Manufacturer	As a reagent for product development in a laboratory scale	PROC 15 Use as laboratory reagent	Industrial / No solid / 8 h/d / Indoors with LEV / General ventilation / Respiratory protection / No preparation / No dermal PPE-Gloves
3 Dyestuff Manufacturer	As a solvent for manufacturing dyestuffs	PROC 4 Chemical production where opportunity for exposure arises	Industrial / No solid / 8 h/d / Indoors with LEV / Without general ventilation / No Respiratory protection / No preparation / No dermal PPE-Gloves
4 Silicone Release Film Manufacturer	As a reagent for manufacturing silicone release films	PROC 5 Mixing or blending in batch processes	Industrial / No solid / 10 h/d / Indoors with LEV / General ventilation / Respiratory protection / No preparation / No dermal PPE-Gloves
5 Urethane & Adhesive Manufacturer	As a reagent for manufacturing urethanes & adhesives	PROC 4 Chemical production where opportunity for exposure arises	Industrial / No solid / 8 h/d / Indoors with LEV / General ventilation / No respiratory protection / No preparation / No dermal PPE-Gloves
6 Cast Product Manufacturer	(1) As a component of release agent in core-making process using cold-box system	PROC 8a Transfer of substance or mixture (charging and discharging) at non-dedicated facilities	Industrial / No solid / 10 h/d / Indoors without LEV / Without general ventilation / No respiratory protection / Preparation (1%) for (1), Preparation (33%) for (2), Preparation (45%) for (3) / No dermal PPE-Gloves
	(2) As a component of hardening media in moulding process		
	(3) As a component of mould wash in mould assembly process	PROC 10 Roller application or brushing	
7 Glass-lense Manufacturer	As (1) a component of hard coating solution & (2) viscosity-controlling agent in hard coating process	PROC 8a Transfer of substance or mixture (charging and discharging) at non-dedicated facilities	Industrial / No solid / 8 h/d / Indoors with LEV / Without general ventilation / No respiratory protection / Preparation (20% for (1)), No Preparation for (2) / No dermal PPE-Gloves

Fig. 2. Surveyed use examples of methanol in industrial sites and the corresponding process categories and OCs/RMMs

용매가 포함된다.³⁰⁾ 이러한 기술적 맥락과 일치하여 안경렌즈 제조회사에서 하드액 성분 및 점도조절제로 메탄올 사용이 확인되었다. 작업자는 하드액 투입, 점도조절(메탄올), 보충, 설비 조작 및 점검, 렌즈의 투입이라는 일련의 작업 시 유해인자(메

틸알코올)에 노출되며, 비고정형 저장용기에 저장 또는 저장용 기로부터 이송, 운반하는 작업을 하게 되므로 공정 범주 PROC 8a로 매칭하였다.

2. ECETOC TRA를 사용한 메탄올의 작업자 노출량 예측 결과

2.1. 조사된 자료의 입력 변수화

메탄올의 현장 용도의 각 공정 조건을 현장 조사한 결과를 Fig. 2로 나타내었다. Table 2는 예측을 위한 각 입력 변수의 option (항목)을 ECETOC TRA 틀에 나온 순서로^{2,18)} 제시한 표이다. 조사된 내용을 Table 2에 따라 어떤 입력 변수 항목을 선택했는지를 Table 3에서 볼 수 있다.

7개 제조회사에서 원료(용매)로 사용한 용도 1, 2, 3, 4, 5 및 점도조절제로 사용한 용도 7-2에서 메탄올은 자체 100% (no preparation)로 사용되었고, 용도 6-1, 6-2, 6-3 및 용도 7에서는 이형제, 경화제, 도형제 및 하드 코팅 용액 성분으로 1%~80% 범위 농도로 사용되었다(Fig. 2). Table 2에 따라 1%와 20%를 제외한 모든 농도는 25% 이상으로 입력하게 된다. 즉, ECETOC TRA 모델에서는 25% 이상과 자체 100% 두 가지 선택의 경우 모두 보정인자(modifying factor)가 1로 같다.^{1,2,18)} 각 용도별 사용한 액상 화학약품(preparation) 내의 물질의 농도 외에 메탄올의 분자량, 증기압, 작업 시간, 메탄올이 사용된 공정에 매칭된 PROC, 작업 시간, 환기 장치 사용 여부, 개인 호흡기보호 장비 사용 여부 및 개인 피부보호 장비 사용 여부를 Table 3과 같이 입력하게 된다.

PROC의 25개 큰 분류 중 어떤 항목을 선택하게 되었는지는 앞서 메탄올의 용도 조사 결과에서 언급되었다. 조사된 메탄올 사용 공정은 화장품 제조회사, 염료 제조회사, 우레탄/접착

제 제조회사에서는 PROC 4에 해당하였다. 계면활성제 제조회사의 연구실에서의 사용은 PROC 15, 실리콘 이형 필름 제조회사에서는 PROC 5, 주물품 제조회사의 중자공정 및 조형공정과 안경렌즈 제조회사의 하드코팅 공정은 PROC 8a, 주물품 제조회사의 합형공정은 PROC10을 입력하였다.

조사된 작업시간은 하루 8~10 시간으로 Table 2에 따라 4시간 이상으로 입력되는데, ECETOC TRA 모델에서 4시간 이상이면 보정인자가 1에 해당한다.^{1,2,18)} 7개 작업장 모두 실내였고, 환기시설은 전체 환기 장치가 있으면서 LEV를 갖춘 작업장이 세 군데, LEV만 갖춘 작업장이 3 군데, 환기장치가 전혀 없는 작업장이 한 군데로 조사되었다. 개인 호흡기 보호장비를 사용하는 작업장은 계면활성제 제조공장의 연구실과 실리콘 이형필름 제조 공정 두 군데가 조사되었고, 개인 피부보호 장비는 모두 사용하지 않는 것으로 조사되어 이에 맞추어 변수 항목을 입력하였다.

2.2. 조사된 OC 및 RMM을 입력한 예측 결과

메탄올의 산업적 용도 10개 사례에 대해 현장에서 조사된 OC 및 RMM을 입력한 결과값은 실제 현장 각 공정에서 작업자에게 노출될 수 있는 예측값이고 5가지 항목으로 출력되었다. 두 가지 단위의 만성흡입노출량(long-term inhalation-workers, ppm (휘발물질일 경우) 및 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 만성피부노출량(long-term dermal-workers), 단기흡입노출량(short-term inhalation-workers), 국소피부노출량(local dermal-workers)으로 산출된 값을 볼 수 있다(Table 3).

5개 노출 예측값 중 만성흡입노출량을 Fig. 3a에 나타내어

Fig. 3. Estimation of methanol exposures using ECETOC TRA (a) by inputting surveyed parameters to predict workplace exposures and (b) by assuming identical worst parameters for all uses to compare exposures of PROCs

비교해 보았다. 작업장 1, 3, 5에 해당하는 PROC 4의 경우, LEV만 있는 작업장 1, 3보다 LEV와 전체 환기 시스템이 같이 있는 작업장 5에서 노출량이 30% 감소한 값으로 예측되었다. LEV와 전체 환기 시스템을 갖추고 호흡기보호 마스크 착용을 한 연구실 사용(PROC 15)이 제일 적은 노출을 보인 반면, 3개 RMM 모두 없이 사용한 주물공장(작업장 6)의 두 개 공정에서 노출이 제일 큰 것으로 예측되었다(작업장 6-2 및 6-3). 작업장 6-2와 6-3이 각 PROC 8a 및 PROC 10으로 다름에도 불구하고 같은 노출량이 예측되었다. 약제(이형제 용도)에서의 메탄올의 농도가 1%로 적은 6-1의 경우 6-2와 PROC 및 RMM이 같은 조건이지만 노출량이 현저히 적게 예측된다. 작업장 7에서의 공정은 작업장 6-1과 같은 PROC 8a이고 메탄올 농도가 훨씬 کم에도 불구하고 LEV를 갖추고 있어 작업장 6-1보다도 노출량이 적게 예측되었다.

2.3. 동일 RMM을 가정하여 입력한 예측 결과

Table 2의 ECETOC TRA의 입력 항목, 즉 농도, 작업 시간 및 위생관리대책-환기장치 사용 여부, 개인 호흡기보호 장비 사용 여부, 개인 피부보호 장비 사용 여부-을 메탄올 10개 용도에 대해 동일하게 넣어, 노출량을 예측해보면 PROC 4, 5, 8a, 10 및 15의 PROC별 노출량을 비교할 수 있다. 임의의 동일 조건으로는 최악의 조건을 선택하여 메탄올을 사용할 때, 5개

PROC에서 노출될 수 있는 최고 노출량을 예측하였다. 그 조건은 100% 메탄올을 전체환기, 국소배기장치, 개인 호흡기 장비 및 피부보호장비를 모두 사용하지 않는다는 것이고 이들 변수를 입력한 노출 예측값 중 만성흡입노출량을 Fig. 3b로 나타내었다.

PROC 5, PROC 8a 및 PROC 10에서의 노출량이 같은 값으로 제일 크며, 다음 순서별로 PROC 4, PROC 15이며, 메탄올의 장기흡입노출량은 250, 100, 50 ppm으로 계산된다. ECETOC TRA 산출에 의하면, 개방된 회분공정에서의 혼합 또는 분산 공정(PROC 5), 비고정형 저장용기에 저장 또는 저장용기로부터 이송, 운반하는 작업(PROC 8a) 및 롤러나 브러시 작업(PROC 10)에서의 노출이 같다. 간헐적인 노출이 있는 회분 또는 합성 공정(PROC 4) 및 소규모 연구소에서 실험실 시약으로의 사용(PROC 15)이 PROC 5, 8a 및 10의 각 40%, 20%로 예측된다.

3. 메탄올의 작업자 노출량 예측값 및 작업장 측정값과의 비교

작업환경측정 자료에서 메탄올의 작업환경측정값을 발체하여 노출예측값과 함께 정리하여 이론치와 실측치를 비교하고자 하였다. 이 경우 비교하는 예측 출력값은 5개 출력값 중에 작업자의 만성흡입노출량(단위는 ppm)이며, 이를 같은 단위로

Fig. 4. Comparison of worker exposures of methanol from different process categories estimated by ECETOC TRA assuming no respiratory protection and those measured by KOSHA guide¹⁷⁾

환산된 작업환경측정값과 같이 Table 4에 나타내었다.

Table 4의 만성흡입노출량 예측값은 Table 3과는 다르게 작업장 2와 작업장 4에서 10배씩 높음을 알 수 있다. 즉, Table 3의 예측값은 각 0.35, 1.75 ppm인 반면 Table 4에는 3.5, 17.5 ppm으로 계산되어 있다. 전자는 10개 용도 중, 작업장 2와 작업장 4의 공정 중에 흡입보호장구(마스크)를 착용하는 것으로 조사되어, 흡입보호장비의 효율을 90%로 입력한 결과이다. 후자는 작업환경측정 시료의 채취는 마스크 밖에서 이루어 지므로, 이의 현장 착용 여부와 관계없이 작업장 2와 작업장 4에서 도 흡입보호장비를 사용하지 않는다고 입력한 결과이다.

이렇게 산출된 예측값을 작업환경측정값과 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 노출예측값을 x축, 각 2번 측정된 실측치를 y축으로 플롯하였고, 예측값과 실측값이 같은 이상적인 점으로 구성되는 기울기가 1인 선형 직선을 함께 표시하였다. 이 직선 위에 분포하면 실측치가 예측치보다 크고, 1보다 작으면 그 반대로 판단할 수 있다.

작업장 1~7-2에 해당하는 값 중 기울기가 1인 선형 직선 위에 위치하는 작업장 5의 한 가지 경우를 제외하고는 모두 기준 직선보다 아래에 위치하였다. 작업장 5의 공정은 PROC 4로 LEV와 전체환기 시스템이 갖추어 있는 것으로 조사되어 예측값이 7 ppm으로 비교적 적게 나왔는데, 이에 비해 실측치가 102 ± 25 ppm로 높게 측정되었다. 이 값을 ECHA에서 제공한 메탄올 만성흡입 독성치 97.5 ppm과 비교해 볼 때 위해 관리가 꼭 필요한 사례이다.

작업환경측정값이 작업장 1, 2, 4, 7-1, 7-2에서 불검출(not detected)로 측정되어서 Table 4에 검출한계를 나타내었다. 작업장별로 각기 다른 담당기관이 측정하고 매 측정 시에 정도 관리를 하고 있어서 검출한계가 작업장마다 다른 값을 가지고 있었다.

IV. 고 찰

1. ECETOC TRA의 입력 변수 및 출력 변수에 대한 고찰

7개 제조회사의 10개 용도가 조사된 메탄올에 대해 ECETOC TRA 툴을 사용하여 작업자 노출을 평가하면서 ECETOC TRA 툴을 사용한 작업자 노출평가의 입력 변수 및 출력값을 살펴보았다. ECETOC TRA 툴을 사용한 작업자 노출 평가는 물질의 분자량, 고체일 경우 분진 정도, 액상일 경우 증기압, 액상 화학약품(preparation) 내의 물질의 농도 혹은 100%로 사용 여부(no preparation), 작업 시간, 물질이 사용되는 현장 공정의 PROC 매칭, 작업 시간, 환기 장치 사용 여부, 개인 호흡기보호 장비 사용 여부 및 개인 피부보호 장비 사용 여부의 정보를 입력하면 Tier 1 노출 예측값을 만성흡입노출, 만성피부노출, 단기흡입노출, 국소피부노출로 산출하였다. 소비자 노출평거나 환경 노출평가에 비해 상대적으로 간단하나, 적

합한 PROC 매칭과 현장 작업장의 공정 파악과 RMM 사용 현황에 대한 정확한 파악이 필요하다.

두 가지 단위의 만성흡입노출량(ppm (휘발물질일 경우) 및 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 만성피부노출량, 단기흡입노출량, 국소피부노출량(local dermal-workers)로 산출된 값은 Tier 1 노출값에 해당하며, 입력 변수와 변수 구분을 간단하게 적용하여 보수적인 값을 산출하는 것으로 알려져 있다.¹⁻¹³⁾

ECETOC-TRA 작업자 툴은 단기흡입노출량 값을 만성흡입노출량 값으로부터 추정인자(estimation factor)를 적용하여 계산한다.¹⁾ 추정인자의 결정은 물질의 증기압력 범위(band)에 따라 이루어지는데 증기압력 값이 0.01 Pa를 초과하면 4를 적용하고, 0.01 이하는 1을 적용한다. 메탄올의 증기압력은 13.02 kPa로 0.01 Pa를 초과하여 단기흡입노출량 값이 만성흡입노출량 값과 4배의 상관관계를 보이고 있다. ECETOC-TRA의 만성피부노출량은 1990년대 초에 개발되고 현재 버전 2가 운영 중인 Estimation and Assessment of Substance Exposure (EASE) 툴의 노출 농도를 적용하고 있다. 예를 들어 Table 3의 작업장 1 (PROC 4)은 초기 만성피부노출량 값으로 6.86 mg/kg/day 를 제시하고 있다. 이는 반응기 등에서 유의한 누출이 발생하고 물질을 직접 취급하며 간헐적인 노출이 발생하는 조건하에서 두 손과 얼굴에 노출되는 값에 해당한다. 두 손바닥 피부면적은 480 cm^2 로 가정하고 국소피부노출량으로 노출량 전량이 480 cm^2 에서 발생하는 것으로 가정하기 때문에 약 $1,000 \mu\text{g/cm}^2 \cdot \text{day}$ 의 노출량을 제시한다.³¹⁾ Table 3의 결과는 모두 LEV가 피부노출에 영향을 미치지 않는 것으로 가정한 값을 알 수 있다. 만일 PROC 4에서 LEV가 피부노출을 저감시킬 수 있는 것으로 충분히 고려할 수 있다면, 노출농도 값은 90% 감소하여 $100 \mu\text{g/cm}^2 \cdot \text{day}$ 이 되기 때문이다. 전체적으로 흡입 노출은 LEV 등 환기장치 여부에 따른 노출농도 변화를 나타내며, 피부 노출은 노출 개연성이 높은 공정과 해당 공정에서의 예상되는 노출 피부 면적에 따라 농도가 산출된다. 예로, PROC 8a는 두 손이 노출 대상이며, PROC 5와 PROC 4는 두 손바닥이 노출면적에 해당한다.^{1,2)}

2. 목적에 따른 입력 변수에 대한 고찰

Table 2의 입력 변수를 모두 넣어야 구동이 가능한데, 변수별 항목을 달리하여 구동해야 원하는 예측값을 얻어 목적에 따라 사용할 수 있다. 본 논문에서는 세 가지 목적을 가지고 노출평가 툴을 구동하였다(Fig. 1). 현장의 작업자에서 노출되는량을 예측하기 위해서는 현장 조건과 가장 가까운 OC 및 RMM이 입력 변수가 된다. 현장 OC 및 RMM을 입력하여 산출한 예측값을 독성치와 비교하면 메탄올 현장 사용에서의 위해성을 미리 스크리닝할 수 있다. 만일 독성치를 넘게 예측되면 RMM을 더 엄격하게 입력하여 재 예측하고 이때 입력한 RMM을 실제 현장에서 실행하는 것이 중요하다.

PROC별로 노출량 크기를 비교해 보는 것이 목적일때는 현장 조건과는 무관하게 비교하고자 하는 PROC을 골라 PROC별 모두 동일한 OC 및 RMM을 넣어야 한다. 이때 RMM을 전혀 사용하지 않는다고 입력하고, 작업조건 변수항목인 물질 농도 100%와 4시간 이상의 작업시간을 입력하면 최악의 조건에서의 노출량, 즉 대상 PROC의 최대 노출량이 산출된다. PROC 설정을 다르게 하면 어느 정도 노출이 달라지는 지 고찰해 볼 수 있었다. 메탄을 사용 공정에 배정된 5개 PROC의 노출예측값은 $PROC\ 10 = PROC\ 8a = PROC\ 10\ (250\ ppm) > PROC\ 4\ (100\ ppm) > PROC\ 15\ (50\ ppm)$ 이었고(Fig. 3b) 이 순서는 타 연구 결과와 일치한다.⁶⁾ PROC별 최대 노출량을 초기(initial) 노출량으로 하여, 각 변수별 입력조건에 따라 노출값이 보정된다.^{2,18)}

각 용도별 조사된 공정에 적합한 PROC을 매칭한 후, 현장의 RMM과 OC를 입력하되, 개인 흡입보호장비의 현장 사용 여부와 관계없이 모든 PROC에 사용하지 않음의 항목을 입력하면 작업환경측정값과 비교할 수 있는 노출량이 산출된다. 즉, 현장에서 사용되는 LEV 등의 환기 RMM을 정확히 입력하는 동시에, 흡입보호구(마스크)는 모두 사용 안한다고 입력해야 결과값이 현장 작업자의 마스크 밖에서 포집되는 시료로부터 분석되는 실측값과 비교될 수 있다.

2.2에서 Fig. 3a에서 작업장 6-2와 6-3이 각 PROC 8a 및 PROC 10으로 다름에도 불구하고 같은 노출량이 예측되었음이 언급되었는데 이유는 같은 조건에서 ECETOC TRA의 PROC 8a 및 PROC 10에서의 초기 노출량이 같은데 기인했음을 Fig. 3b에서 알 수 있다. 또한 작업장 6-2와 6-3의 조사된 현장 작업조건 및 RMM이 같고 메탄을 농도는 다르지만 두 경우 모두 농도를 25% 이상이라는 같은 변수를 선택하여 입력하기 때문이다(Table 3).

마지막으로 실측값과 비교하기 위한 예측값 산출은 현장에서 조사된 RMM (Table 3)과 모두 같은 조건이나 개인호흡기 보호 장비는 없다고 입력하여야 함(Table 4)을 주지하여야 한다. 이유는 앞서 언급하였듯이 작업환경측정에서 시료 포집이 호흡기보호장비의 유무와 관계없이 개인이 시료채취장비를 찬 상태에서 이루어지기 때문이다. RMM 중 피부보호장비의 유무는 흡입노출예측값에 영향을 주지 않는다.²⁾

3. ECETOC TRA의 노출 예측 능력에 대한 고찰

노출평가 틀은 정확성과 보수성에 있어 균형이 필요하다. 틀의 실제 현장 노출값 예측의 정확성을 높이면 보수적 관점에서 예측값을 초과하는 사업장이 많아지게 된다. 따라서 제도적 활용성 제고를 위한 노출평가 틀은 목적에 맞는 예측 수준(Tier 1~2)의 결정이 필요하고, 이에 부합하여 사용해야 한다.

노출평가 틀의 정확성 및 보수성에 대한 평가 방법에 대해 최근 리뷰 보고가 있다.¹²⁾ 예로, 정확성 평가에 PRED/EXP 계수가 사용되는데^{7,12)} PRED (예측값)=EXP (실측값)일 때 이상적

이고, 1보다 크면 과대평가임을 의미한다. median PRED/EXP를 구하여 틀 종류별, 변수별, 물질별 등에 따른 예측 능력을 비교하는데 유기용매의 경우 median PRED/EXP가 2.0이었고, PRED/EXP의 범위가 0.02~228인 보고가 있다.⁷⁾ 통계적으로 bias (absolute/relative), precision을 구하는 방법도 있는데, 여기서 bias는 로그스케일로 변환한 예측값과 실측값의 평균 차이이며, precision은 bias의 표준편차이다. Bias가 플러스 값일 경우 틀의 과대평가를 의미한다.^{6,8,12)}

데이터가 많지 않았던 본 연구에서는 ECETOC TRA 예측값과 작업환경측정값의 결과를 가장 쉽게 파악할 수 있도록 Fig. 4와 같이 플롯하였다. 작업장 1~7-2에 해당하는 값 중 기준이 되는 기율기 1의 선형직선 위에 위치한 작업장 5의 한 가지 경우를 제외하고는 모두 기준 선 아래에 위치함을 알 수 있다. 다른 문헌 상에서와 같이¹⁻¹³⁾ ECETOC TRA의 원래 의도하는 기능인 ECETOC TRA의 보수적 예측 결과를 보여주는 사례가 됨을 알 수 있다. 그러나 실측값에서 불검출된 경우가 10개 중 5개이고, 실측값이 부족하여 통계적 처리를 하기에는 한계가 있었으므로, 향후 지속적 연구가 필요하다.

노출평가 틀에 요구되는 정확성과 보수성의 균형은 작업현장의 물질 사용 용도(시나리오)와 작업환경측정 자료(노출 실측값)에 기반을 두어야 한다. 현재까지 우리나라는 작업장을 대상으로 산업분류별 물질사용 시나리오 개발 연구가 충분하지 않다. 또한 노출평가 틀에 내재되어 있는 시나리오가 작업환경 측정 프로토콜을 명확히 반영하고 있는지도 확인이 필요하다. 이러한 과정에서 작업환경 측정 빅데이터의 활용은 절대적으로 필요한 상황이다.

4. 산업 현장의 메탄을 노출 실태 고찰

산업 현장에서 사용되는 메탄올의 위해 여부를 판단할 때 독성기준치가 필요한데, ECHA에서 제공하는 독성치가 ECETOC TRA의 5개 노출결과값과 비교할 수 있는 5개 독성치를 제공하므로 ECHA의 Derived No Effect Levels (DNELs)을 사용하였다(Table 1). RMM이 전혀 없고 농도도 100%를 사용할 경우의 각 공정에서 발생할 수 있는 노출예측량은 Fig. 3b에 나타내었다. 메탄올의 ECHA 만성흡입독성치 97.5 ppm과 비교할 때 실험실 사용이 독성치 이하, PROC 4로부터의 노출량은 독성치와 유사, PROC 5, 8a, 10은 약 2.5배가 넘는 노출이 발생하게 됨이 일차적으로 스크리닝되고 있다. Fig. 3a의 실제 작업장 노출예측값과 비교해보면 다행히 작업장마다 사용하고 있는 RMM이 있고 메탄올 농도도 낮은 약제를 사용하고 있는 곳도 있어, 작업장 6-2 및 6-3을 제외한 다른 작업장은 독성치 이하의 노출이 예측된다.

Fig. 3b에서처럼 아무 환기 시설을 사용하지 않는 최악의 RMM의 경우 PROC 4에서 노출되는 양이 100 ppm임을 감안할 때 실측치는 예측치에서 크게 벗어난 값이 아닌 현장의 상

황에 따라 예상할 수도 있는 범주의 값으로 사료된다. 즉, 조사한 RMM과는 달리 현장에서 충분한 환기가 이루어지지 않았을 가능성도 배제할 수 없고 이러한 상황에서 측정된 값으로 생각할 수 있다.

메탄올의 만성흡입독성치 97.5 ppm과 작업장 측정값을 비교해볼 때 유일하게 작업장 5에서 독성치와 유사한 값을 작업자가 흡입할 수 있는 상황으로 평가된다. 따라서, 작업장 5에서는 조사된 국소배기장치 및 전체환기시스템이 잘 가동하는 지를 늘 모니터링하는 것이 필요하고 개인호흡기보호장비(마스크)의 착용도 권고된다.

Fig. 3a에서 볼 수 있듯이 독성치보다 높은 노출이 예측된 작업장 6-2와 6-3에서의 현장 실측치는 각 평균 20.5 및 36.3으로 측정되었지만(Table 4, Fig. 4), 현재 어떤 RMM도 사용하고 있지 않으므로 각별한 주의 및 개선이 필요하리라 사료된다.

5. 작업환경측정 자료의 한계성에 대한 고찰

작업환경측정은 산업안전보건법에 따라 1982년부터 시행되어 왔고,¹⁶⁾ 측정대상 물질은 화학적 인자 중 유기화합물만 113종에 달하므로,²¹⁾ 방대한 자료가 있으리라 사료된다. 그러나, 작업자의 안전을 위한 측정값은 많이 축적되어 있지만, 툴 구동을 위한 입력 변수는 없어 별도로 조사해야만 한다. PROC 매칭을 위해서는 작업환경측정 주체의 PROC에 대한 이해가 필요하고, RMM을 사용할 때 효율까지 조사해야 한다. 예로, 본 연구의 현장 조사에서, 마스크 착용 여부는 조사했지만 마스크의 효율 파악은 현장에서 불가능했으며, 따라서 90%로 가정하여 툴을 구동하였다. 작업환경측정은 계속되고 있지만 입력 변수 조사가 수반되지 않고 또한 공유할 수 없으면 툴 검증 및 선에 대한 연구는 제한된다. 무엇보다도, 노출평가 툴의 개선과 효율적인 사용의 필요성과 이를 위해 현장 조사(입력 변수)의 정확성이 필수적임에 대해 관련 부서간의 공감대 형성 및 협력이 필요하다. 노출평가 툴에 요구되는 정확성과 보수성의 균형은 작업현장의 물질 사용 용도(시나리오)와 작업환경측정 자료(노출 실측값)에 기반을 두어야 한다. 현재까지 우리나라는 작업장을 대상으로 산업 분류 별 물질사용 시나리오 개발 연구가 충분하지 않다. 또한 노출평가 툴에 내재되어 있는 시나리오가 작업환경 측정 프로토콜을 명확히 반영하고 있는지도 확인이 필요하다. 이러한 과정에서 작업환경 측정 빅데이터의 활용은 절대적으로 필요한 상황이다.

V. 결 론

EU REACH의 화학물질 위해관리의 이행 시, 작업장 노출시나리오 모든 경우에 직접 측정이 거의 불가능한 상황에서 작업자 노출평가의 프로토콜이 되어온 ECETOC TRA가 국내 제도적 활용을 위해 도입되었고, 비교적 간단한 변수를 입력하여 보

수적인 노출량을 산출하는 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 7개 작업장의 10개 메탄올 용도 중 9개의 용도에서 예측값이 실측값보다 큰 보수적인 결과를 얻어, ECETOC TRA 툴에 기대하는 보수성을 확인해보았으나 실측치가 충분하지 않고 결과가 불검출인 측정값이 많은 한계점이 있었다. 노출평가 툴의 예측능력의 정확성을 위해서는 툴 개발자, 기존에 오랜기간 수행해온 작업환경측정의 관리자 및 연구개발자의 협력이 필요하다. 작업환경노출평가 툴 개발자는 툴의 핵심 내용에 대한 적극적인 공개를 하고, 작업환경측정 관리자는 향후 법적으로 지속될 작업환경측정을 노출평가 툴과 연계된 입력 변수 조사와 같이 병행한다면 방대하고 가치 있는 자료가 축적될 것이다. 측정된 국내 자료 활용을 통해 국내 상황에 맞는 작업자 노출평가 툴로 업데이트하면 정확한 노출 예측 및 위해도 스크리닝에 효율적으로 사용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-17-01-KIST Europe)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Conflict of Interest

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

References

1. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. ECETOC Technical Report No. 114. ECETOC TRA Version 3: Background and Rationale for the Improvements. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; 2012.
2. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. User Guide for the Integrated Tool TRAM Version 3.1. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; 2017.
3. Urbanus J, Henschel O, Li Q, Marsh D, Money C, Noij D, et al. The ECETOC-targeted risk assessment tool for worker exposure estimation in REACH registration dossiers of chemical substances-current developments. *Int J Environ Res Public Health*. 2020; 17(22): 8443.
4. 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. *Int J Occup Med Environ Health*. 2011; 24(2): 208-217.
5. Ko WK, Yi YS. A study on the risk assessment by comparing workplace environment measurement with exposure assessment program (ECETOC TRA). *J Korea Saf Manag Sci*. 2013; 15(3): 1-6.
6. Kim KE, Kim J, Jeon H, Kim S, Cheong Y. Enhancement of oc-

- cupational exposure assessment in Korea through the evaluation of ECETOC TRA according to PROCs. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(2): 173-185.
7. Spinazzè A, Lunghini F, Campagnolo D, Rovelli S, Locatelli M, Cattaneo A, et al. Accuracy evaluation of three modelling tools for occupational exposure assessment. *Ann Work Expo Health*. 2017; 61(3): 284-298.
 8. Lee S, Lee K, Kim H. Comparison of quantitative exposure models for occupational exposure to organic solvents in Korea. *Ann Work Expo Health*. 2019; 63(2): 197-217.
 9. 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. *Ann Work Expo Health*. 2019; 63(2): 218-229.
 10. Ishii S, Katagiri R, Kitamura K, Shimajima M, Wada T. Evaluation of the ECETOC TRA model for workplace inhalation exposure to ethylbenzene in Japan. *J Chem Health Saf*. 2017; 24(1): 8-20.
 11. Moon J, Ock J, Jung U, 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.
 12. Spinazzè A, Borghi F, Campagnolo D, Rovelli S, Keller M, Fanti G, et al. How to obtain a reliable estimate of occupational exposure? Review and discussion of models' reliability. *Int J Environ Res Public Health*. 2019; 16(15): 2764.
 13. Fransman W. How accurate and reliable are exposure models? *Ann Work Expo Health*. 2017; 61(8): 907-910.
 14. National Institute of Environmental Research. NIER-GP2016-163. Guidance Document for the Preparation of Chemical Safety Report 2021 Ver.2. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2021.
 15. Korea Institute of Industrial Technology. NIER-SP2018-164. Study for the Evaluation Process of Chemical Safety Report Prepared under K-REACH (I). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019.
 16. Korea Ministry of Government Legislation. Act No. 3532. Occupational Safety and Health Act. Available: <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=4829&viewCls=lsRvsDocInfoR#> [accessed 1 September 2021].
 17. Korea Occupational Safety and Health Agency. KOSHA Guide A-117-2014. Technical Guideline to Methanol Exposure Measurements According to the Working Environment Monitoring System. Ulsan: Korea Occupational Safety and Health Agency; 2014.
 18. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. Targeted Risk Assessment. Available: <https://www.ecetoc.org/tools/targeted-risk-assessment-tra> [accessed 10 May 2021].
 19. European Chemicals Agency. Methanol Toxicological Summary. Available: <https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15569/7/1> [accessed 27 August 2021].
 20. The National Institute for Occupational Safety and Health. Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Values for Methyl Alcohol. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/67561.html> [accessed 11 October 2021].
 21. Korea Occupational Safety and Health Agency. KOSHA 2012-Instructional media-979. Guidance on Working Environment Monitoring System. Ulsan: Korea Occupational Safety and Health Agency; 2012.
 22. Toray Advanced Materials Korea Inc., assignee. Silicone release film and manufacturing method thereof. South Korea KR101522941B1. 2015 May 26.
 23. Korea Occupational Safety and Health Agency. Instruction Materials for Safety in a Casting and Forging Industry Sector. Ulsan: Korea Occupational Safety and Health Agency; 2014.
 24. Korean Agency for Technology and Standards. Standard Terms for a Metal Industry Sector. Gwacheon: Korean Agency for Technology and Standards; 2010.
 25. Gooch JW. Parting agent. In: Gooch JW. editor. Encyclopedic Dictionary of Polymers, 2nd ed. New York: Springer; 2011. p.697.
 26. Haewon FM Co., Ltd. Parting Agents, Breakdown Agents, Adhesive Agents. Available: http://haewonfm.com/en/en_pro4/ [accessed 15 July 2021].
 27. Lee HJ, Yang JJ, Hyeon HJ. Research on the mold wash application technique for improving the surface quality of 3D printing sand mold. *J Korean Soc Manuf Technol Eng*. 2018; 27(6): 485-491.
 28. Svidró JT, Diószegi A, Svidró J, Ferenczi T. The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process. *J Therm Anal Calorim*. 2017; 130: 1769-1777.
 29. Lee JH, Yu DS, Park SY, Do YW, Ha JW. A study on the hard coating of ophthalmic lens. *Theories Appl Chem Eng*. 2006; 12(1): 40-43.
 30. Kolon Industries, Inc., assignee. Composition for hard coating and hard coating film including cured product of the same as the coating layer. South Korea KR101967146B1. 2019 Apr 9.
 31. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. ECETOC Technical Report No. 107. Addendum to ECETOC Targeted Risk Assessment Report No. 93. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; 2009. p.69-70.

〈저자정보〉

나진성(수석연구원), 송문환(연구원), 최은경(수석연구원)