

ECETOC TRA 변수를 활용한 세척작업의 노출특성 분석 및 실효적 노출 저감방안 도출

조지훈^{1,2} · 이혜진¹ · 정기효^{2,3*}

¹한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ²울산대학교 산업경영공학전공, ³울산대학교 안전보건전문학과

Analysis of Exposure Characteristics in Cleaning Operations using ECETOC TRA Variables and the Development of Effective Improvement Strategies

Jihoon Jo^{1,2} · Hye Jin Lee¹ · Kihyo Jung^{2,3*}

¹Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

²School of Industrial Engineering, University of Ulsan

³Department of Safety and Health, University of Ulsan

ABSTRACT

Objectives: This study analyzed the exposure characteristics of trichloroethylene (TCE) cleaning operations using the ECETOC (European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals) TRA (Targeted Risk Assessment) and derived variable-level strategies for reducing occupational exposure.

Methods: From among 21,719 workplace measurement records (2018–2022), 357 TCE cleaning scenarios were extracted and coded into five ECETOC TRA input variables: an initial exposure estimate (E_{ini}) composite comprising process category (PROC), sector of use (SU), local exhaust ventilation (LEV), and fugacity; ventilation; respiratory protective equipment (RPE); concentration; and duration. Model sensitivity (S_i) and a field improvement margin score (IMS) were combined into an effectiveness index ($EI = S_i \times IMS$) to prioritize intervention targets. Six single-variable (A–E, G) and two combined (F1, F2) improvement scenarios were simulated.

Results: Estimated 8-hour TWA (time-weighted average) inhalation exposure showed a median of 5.48 mg/m³ and a mean of 27.4 mg/m³, with 45 scenarios (12.6%) exceeding the OEL (occupational exposure limit) of 10 ppm (54.75 mg/m³). The EI ranking was E_{ini} composite (17.7) > concentration (15.3) > RPE (13.2) > ventilation (6.6) > duration (2.1). Scenario A (PROC enclosure) produced the largest single-variable effect (80.8% mean reduction; 45 → 7 exceedances), followed by B (full LEV installation, 68.6%), D (64.1%), E (42.9%), G (39.7%), and C (20.6%). Combined scenarios reduced mean exposure by 87.8% (F1) and 92.6% (F2), with model-estimated residual exceedances of 2 and 0, respectively.

Conclusions: The model-based results suggest that the EI framework can provide a systematic basis for prioritizing exposure controls; validation across other substance-task combinations is warranted.

Key words: Cleaning operation, ECETOC TRA, effectiveness index, exposure assessment, trichloroethylene

1. 서 론

산업현장에서 유해화학물질 노출로부터 근로자를 보

호하기 위한 노출평가는 각국의 보건 정책 기조에 따라
상이한 경로로 발전해 왔다. 국내 산업보건 체계에서
가장 지배적인 노출 관리 수단은 1981년 산업안전보건

*Corresponding author: Kihyo Jung, Tel: 052-259-2709, E-mail: kjung@ulsan.ac.kr

93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, 44610

Received: August 27, 2026 Revised: September 18, 2026, Accepted: September 28, 2026

 Jihoon Jo <http://orcid.org/0000-0003-1418-7518>

 Hye Jin Lee <http://orcid.org/0000-0002-1028-0611>

 Kihyo Jung <https://orcid.org/0000-0003-3316-2762>

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.

법 제정과 함께 의무화된 작업환경측정 제도이다. 동법 제125조는 사업주로 하여금 고용노동부령으로 정하는 작업장에 대하여 고용노동부장관의 지정을 받은 측정기관 등 자격을 갖춘 자가 작업환경측정을 실시하도록 하고, 그 결과를 기록·보존하며 고용노동부장관에게 보고하도록 규정하고 있다. 또한 측정 결과에 따라 시설·설비의 설치 또는 개선, 건강진단 실시 등 적절한 조치를 하도록 하여, 측정이 사후적 개선 조치와 연계되는 구조를 취하고 있다(MoEL, 2026). 이 제도는 지난 40여년간 근로자의 노출 수준을 직접 측정하여 법적 기준 준수 여부를 확인하는 주요한 도구로 기능해 왔으나, 국제적인 흐름과는 차이가 존재한다. 유럽 등 선진국에서는 2007년 REACH 도입 이후 실제 측정 외에도 노출 모델링이나 컨트롤 밴딩과 같은 노출량 추정방식을 위험성 평가의 유효한 수단으로 적극 활용하는 추세이다(Lee et al., 2020; Schlueter & Tischer, 2020). 반면 국내의 현행 측정 체계는 공기 중 농도라는 최종 결과값에만 집중하는 행정적 사후 관리에 편중되어 있다는 비판이 다수의 선행 연구에서 제기되어 왔다. Jeong et al.(2021)은 사업장에서 실시한 작업환경측정 결과의 노출 수준이 정부의 신뢰성 평가 측정값 및 노출 추정 모델값과 비교하여 현저히 낮게 나타난다고 보고하였으며, Lee et al.(2020) 전문가 인터뷰 조사에서도 작업환경측정 결과의 한계점에 대한 우려가 수렴된 바 있다. 특히 이들 연구에서는 현행 작업환경측정 결과표가 공정 조건, 작업 방식, 환기 설비의 실제 가동 상태와 같은 맥락 정보를 체계적으로 기록·관리하는 구조를 갖추고 있지 않아, 노출에 기여하는 핵심 공정 변수를 식별하기 어렵고, 결과적으로 실효성 있는 개선방안을 도출하는 데 제약이 된다는 점이 공통적으로 지적되었다(Lee et al., 2020; Jeong et al., 2021).

이러한 측정 데이터의 정보 불완전성을 보완하기 위한 대안으로 모델링 접근법의 활용이 주목받고 있다. Box(1976)가 “모든 모델은 틀렸다”라고 지적하고 이후 “일부는 유용하다”로 보완한 바와 같이(Box & Draper, 1987), 모델링은 핵심 결정요인을 식별하고 변수 변화에 따른 결과를 예측하는 데 유용한 도구이며, 이러한 모델링의 실용적 가치는 보건 역학(Anderson & May, 1991), 약동학(Gibaldi & Perrier, 1982) 등 전 학문 영역에서 실증되어 왔다. 산업보건 분야에서도 환기 공학(Tum Suden et al., 1990), 인간공학(Chaffin, 2007) 등에서 모델링의 성과가 보고되고 있으며, 유해

화학물질 노출 평가 영역에서도 Cherrie et al.(2020)이 REACH 등 규제 목적의 노출 평가에서 모델의 유효성을 논하였고, 국내에서도 Lee et al.(2020)과 Jo et al.(2024)이 ECETOC TRA 등 노출 추정 도구를 활용하여 국내 작업환경에서의 노출 특성을 분석한 바 있다.

한편, 국내 세척작업은 이러한 체계적인 분석이 시급한 고위험 영역으로 분류된다. Lee HJ et al.(2023)이 국내 유통 세척제 제품의 MSDS를 분석한 결과, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1-브로모프로판 등 고유해성 할로겐화 유기용제가 세척 용도 제품의 주요 성분으로 광범위하게 사용되고 있음이 확인되었다. 동 연구의 현장 조사에서는 할로겐화 유기용제를 사용하는 세척작업의 노출기준 초과 비율이 30%에 달하였으며, ECETOC TRA 모델 추정값보다 실제 측정 노출 수준이 약 70%의 사례에서 더 높게 나타나, 국내 세척 방식이 유럽 노출 모델이 전제하는 작업 조건보다 상당히 위험한 수준임이 확인되었다. 국내 세척작업 관련 재해 사례를 살펴보면, 1991년 TCE 세척통 내부 청소 작업 중 4명 질식 사망, 2002년 TCE 과민성 증후군 사망, 2010년 디클로로메탄 세척조 누출 청소 중 사망, 2015년 TCE 세척조 청소 작업 중 2명 사망에 이르기까지 유사한 재해가 반복되어 왔으며(Lee N et al., 2023; Lee et al., 2024), 가장 최근인 2022년에는 경남 소재 2개 사업장에서 총 29명 이상의 근로자에게 트리클로로메탄 함유 세척제로 인한 집단 독성 간염이 발생하여 중대재해처벌법 기소 1호 사건이 되었다(Lee HJ et al., 2023; Lee et al., 2024). 이러한 사고의 재발은 사업장이 고유해성 물질의 사용을 고수하고, 밀폐형 자동화 설비로의 전환을 위한 사회적·기술적 인프라가 부족한 상태에서 규제 물질이 비규제 물질로 대체되는 순환이 반복되고 있기 때문인 것으로 분석된다(Lee et al., 2024).

국외 선진국들 역시 세척·탈지 공정에서 사용되는 유해물질로 인한 심각한 재해를 경험하며 규제를 단계적으로 강화해 왔다. 일본에서는 2012년 오사카 소재 인쇄업체에서 1,2-디클로로프로판(1,2-DCP)과 디클로로메탄에 노출된 근로자들에게서 담관암이 집단 발생하였으며(Kumagai et al., 2013), 이는 IARC가 이후 1,2-DCP를 발암성 1그룹으로 분류하는 근거의 하나가 되었다. 미국에서는 디클로로메탄 관련 사망 사례가 1980년부터 2018년까지 85건(이 중 74건이 직업적 노출)에 달한 것으로 보고되었으며(Hoang et al., 2021),

이에 EPA는 TSCA에 근거하여 2024년 5월 디클로로메탄의 대부분 상업적 사용을 금지하는 최종 규정을 공포하였고(U.S. EPA, 2024a), 같은 해 12월에는 TCE에 대해서도 증기 탈지 세척을 포함한 대부분의 상업적 사용을 단계적으로 금지하는 최종 규정을 발표하였다(Lee et al., 2024; U.S. EPA, 2024b). 유럽에서는 염소계 용제 생산자단체(ECSCA)가 2007년 자발적 협약(charter)을 통해 개방형 금속세척 설비에 대한 TCE 판매를 2010년 말까지 단계적으로 중단하기로 서명·약속한 데 이어(ECSCA, 2007), EU가 2013년 REACH 부속서 XIV에 TCE를 허가 대상 물질(substance subject to authorisation)로 등재하여 사용을 엄격히 관리하고 있다(Slunge et al., 2022). 특히 이러한 규제들은 단순히 물질 사용을 금지하는 데 그치지 않고, 고도의 제어 기술을 갖춘 폐쇄형 세척 설비 사용만을 예외적으로 허용하는 등 노출 변수 자체를 통제하는 방향으로 진화해 왔다는 점에서 주목할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 국내 작업환경측정 데이터와 ECETOC TRA 노출평가 툴의 주요 변수를 활용하여 국내 TCE 세척작업의 노출 특성을 체계적으로 분석하고, 변수 조정을 통한 개선 시나리오의 유효성을 탐색하고자 한다. TCE 사용 사업장의 실제 측정 데이터를 분석하여 노출 수준에 대한 영향력이 큰 핵심 변수를 식별하고, 문헌 조사를 통해 확인된 물질 대체, 공정 자동화, 작업 온도 최적화 등의 사례를 모델링 변수에 적용하여 가상의 노출 저감 효과를 정량적으로 분석할 것이다. 이를 통해 유해화학물질 노출 분석에 있어 노출 변수를 활용한 체계적 접근이 단순한 농도 측정 이상의 실효적인 예방 전략 수립에 기여할 수 있는지를 확인하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상 선정

1) 연구대상 노출평가 도구

본 연구에서는 세척작업의 노출 특성을 체계적으로 분석하기 위한 도구로 ECETOC TRA v3.2를 선정하였다. ECETOC TRA는 1단계(Tier 1) 노출 추정 도구로서, 물질의 물리화학적 특성과 작업 시나리오를 기반으로 흡입 및 경피 노출량을 산출하도록 설계되었다(ECETOC, 2012). ECETOC TRA는 보수적으로 추정하도록 설계되었다고 제시되어 있으나, 일부 공정 범주·물질 조합에서 실측값보다 낮은 추정치를 산출하는

과소평가 사례가 보고되어 있어(Spinazzè et al., 2019; Savic et al., 2023), ‘보수적’이라는 전제를 무조건적으로 수용하기는 어렵다. 이 도구는 ECHA가 REACH 등록을 위한 화학물질 안전성 평가(CSA)에서 활용을 권고하는 대표적인 tier 1 노출 추정 도구로서, 작업자·소비자·환경 모듈은 ECHA의 Chesar 소프트웨어에 통합되어 있으며, 작업자 노출 모듈은 v3.2부터 독립형(stand-alone) 도구로도 제공되고 있어 REACH 등록 서류 작성에 광범위하게 사용되고 있다(Schlueter & Tischer, 2020; ECETOC, 2023).

다양한 정량적 노출 모델 중에서도 ECETOC TRA는 작업환경측정 자료의 공정 맥락 정보와 변수 매칭이 용이하며, PROC, LEV, Fugacity 등에 의해 결정되는 초기노출추정값(E_{ini})에 환기(Ventilation), 노출시간(Duration), 함유량(Concentration), 호흡보호구(RPE) 등의 외부 보정계수가 곱셈으로 결합되는 구조를 지니고 있어, 각 변수의 변화가 최종 노출 추정치에 미치는 영향을 체계적으로 추적할 수 있다. 다만, E_{ini} 는 공정범주(PROC)·사용부문(Sector of Use, SU; 산업용 또는 전문가용)·휘발성(Fugacity)의 조합으로 참조 테이블에서 단일 값으로 조회되고, LEV는 조회값 자체를 변경하지 않으며 산업용 0.1·전문가용 0.2의 별도 곱셈 감소계수로 적용되므로, 네 요소의 완전한 독립 분리가 구조적으로 제한되며, 이에 대한 분석 방법은 II-3에서 별도로 기술한다. 한편, tier 1.5에 해당하는 Stoffenmanager는 발생원과의 거리·작업장 체적 등의 정보를, tier 2 모델인 ART는 발생원 특성 및 오염 정도 등의 추가 정보를 필요로 하며(Lee et al., 2020), 이러한 정보는 현재의 작업환경측정 결과표를 통해 입수하기 매우 어렵다. 본 연구는 추정치의 절대적 정확도가 아닌 각 노출 변수의 상대적 기여도 비교에 초점을 두고 있으므로, 변수 구조가 명확하고 입력값 변화에 따른 출력값 변동을 체계적으로 추적할 수 있는 ECETOC TRA v3.2를 분석 도구로 선정하였다.

2) 연구대상 유해인자

연구대상 유해인자는 국내 세척공정에서 광범위하게 사용되면서도, 강한 휘발성과 높은 독성으로 인해 근로자의 건강 장애 위험이 큰 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE; CAS 79-01-6)을 선정하였다. TCE의 분자량은 131.39 g/mol이며, 상온(20°C) 증기압은 약 7.8 kPa로, ECETOC TRA가 정의하는 4

단계 휘발성 등급 중 중간정도의 휘발성(Medium Fugacity)에 해당한다(ICSC, 2013). TCE는 IARC 발암성 1그룹 물질이며, Lee HJ et al.(2023)의 분석에서 할로겐화 용제 세척 공정 중 약 40%를 차지하여 세척 공정과의 연관성이 가장 높고, Jo et al.(2024)의 국내 작업환경측정 결과에서 불검출률이 64.4%로 특별관리 물질 유기화합물 중 가장 낮은 물질 가운데 하나여서, 노출 변수 분석에 적합한 대상 물질로 판단하였다.

3) 연구대상 자료

본 연구는 2018년부터 2022년까지 작업환경측정 결과 데이터베이스 및 작업환경측정 결과표를 대상으로 TCE를 사용하는 세척공정 자료를 수집하였다(Jo et al., 2024). 수집된 자료 중 ECETOC TRA 모델링에 필수적인 변수를 추출할 수 있는 구체적인 공정 정보가 포함된 사례를 선별하였으며, 최종적으로 ECETOC TRA v3.2의 필수 입력변수(PROC, Fugacity, Duration, LEV, Concentration, RPE)에 대한 결측이 없고 변수 매칭이 가능한 유효 데이터셋으로 구성하여 분석의 기초 자료로 활용하였다.

2. 연구대상 자료 분석 및 노출변수 추출

1) 작업환경측정 결과표 분석 및 자료 추출

수집된 작업환경측정 결과표를 바탕으로 세척작업의 노출 특성을 결정짓는 주요 변수를 추출하였다. 특히 결과표의 '예비조사 항목'인 작업공정별 유해요인 분포 실태, 유해요인 발생 실태, 작업환경설비 실태 및 MSDS 관련 정보를 정밀하게 분석하였다(Jo et al., 2024). 세척 작업의 방식(수동 담금, 초음파 세척, 자동화 설비 등)에 대한 정성적 기재 사항을 검토하여 ECETOC TRA의 PROC와 매칭 가능한 특성 정보를 확보하였으며, 세척액의 가열 여부, 실내외 작업 구분, 국소배기장치의 설치 형식 및 가동 효율에 대한 데이터를 함께 추출하였다. 작업환경측정 결과표의 정보가 제한적인 경우 안전보건공단의 신뢰성 평가 결과를 우선하여 보완하였다(Jo et al., 2024).

2) 추출자료 인코딩

추출된 공정 정보는 ECETOC TRA v3.2 모델의 입력 변수 형식에 맞추어 인코딩하였다. 인코딩 기준은 ECETOC TRA 기술 지침서(ECETOC, 2012; ECETOC, 2018) 및 관련 선행 연구(Jeong et al., 2021)를 준용

하여 다음과 같이 설정하였다.

PROC는 작업환경측정표상의 작업 내용을 REACH 규정의 PROC 정의와 대조하여 매칭하였다. Fugacity는 TCE의 상온 증기압(약 7.8 kPa, Medium)을 기준으로 하되, 가열을 수반하는 작업의 경우 증기압이 10 kPa 이상으로 상승하여 High로 조정하였다. Duration은 일일 노출 시간을 기준으로 4단계 범주('15분 미만', '15분-1시간', '1-4시간', '4시간 초과')로 변환하였다. LEV의 유무는 현장 조사 기록을 바탕으로 'Yes' 또는 'No'로 구분하였고, 실내외 여부 및 Industrial/Professional 작업 구분 변수를 함께 인코딩하였다. 입력변수와 직접 관련된 정보가 제한되는 경우에는 최악의 작업환경으로 가정하여 보수적으로 인코딩하였다(Jo et al., 2024). Concentration은 MSDS 및 결과표에 기재된 제품 조성 정보를 바탕으로 4단계로 구분하였으며, RPE의 착용 여부 및 등급은 현장 조사 기록 또는 신뢰성 평가 보고서를 참조하여 'No RPE' 또는 'RPE 95%(APF 20)'로 인코딩하였다. 한편 사업장 규모(상시 근로자 수)는 ECETOC TRA의 입력변수는 아니나, 국내 세척작업의 일반적 특성을 기술하기 위하여 작업환경측정 결과표의 사업장 일반사항으로부터 '50인 미만', '50-299인', '300인 이상'의 3개 범주로 함께 추출하였다.

3) 노출평가 모델 변수값 입력 및 노출 추정치 산출

최종 선별된 유효 데이터셋의 인코딩된 입력값들은 ECETOC TRA v3.2 도구의 시나리오 입력 셀에 개별적으로 입력하여, 각 세척 작업 시나리오별 8시간 가중평균 흡입 노출 추정치를 산출하였다.

3. 자료분석 및 시각화

노출 추정 데이터의 정리 및 전처리는 Microsoft Excel 2021을, 노출특성 분석·통계분석 및 시각화에는 R 소프트웨어(버전 4.6.0)를 활용하였다. ECETOC TRA v3.2의 근로자 흡입노출 추정식은 식 1과 같으며, 본 연구의 분석은 이 추정식의 곱셈 구조를 기반으로 Table 1과 같이 네 단계로 구성하였다.

$$E_{inh} = E_{ini} \times MF_{vent} \times MF_{dur} \times MF_{conc} \times MF_{RPE} \quad (\text{식 1})$$

여기서 E_{inh} 는 8시간 가중평균 흡입노출 추정치, E_{ini}

Table 1. Four-step analytical framework of this study

Step	Objective	Target data	Method and equation	Key output
1. Characterization of the exposure space	Evaluate the theoretical exposure influence of each variable without confounding by other variables, and locate the field distribution within it	Theoretical full-factorial scenarios (n = 6,912) vs. field scenarios (n = 357)	$E_{inh} (mg/m^3) = E_{ini} (ppm) \times (MW/24) \times MF_{vent} \times MF_{dur} \times MF_{conc} \times MF_{RPE}$; one-sample Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test	Distribution of theoretical vs. field exposure estimates (Figure 1)
2. Model-intrinsic sensitivity	Quantify the contribution of each variable inherent to the model structure	Five input variables of ECETOC TRA v3.2	OAT sensitivity analysis (Riedmann et al., 2015): $S_i = \log_{10}(r_i) / \sum \log_{10}(r_j) \times 100$, where $r_i = \max(m_{i,j}) / \min(m_{i,j})$ (Eq. 2)	S_i (%) by variable (Table 3)
3. Field improvement margin and effectiveness	Complement S_i , which reflects only theoretical range, with the actual field distribution of each variable	357 field scenarios	$IMS_i = \sum \{(MF_{current,k} - MF_{optimal}) / (MF_{worst} - MF_{optimal})\} / N$ (Eq. 3); $EI_i = S_i \times IMS_i$ (Eq. 4)	IMS, EI, and priority ranking (Table 3, Figure 2)
4. Improvement simulation	Verify the exposure reduction achievable by adjusting high-priority variables	357 field scenarios	Six single-variable scenarios (A, B, C, D, E, G) and two combined scenarios (F1, F2); recalculation of E_{inh} under each setting	Mean reduction (%) and residual OEL exceedances (Table 4)

Note: Data handling and preprocessing were performed in Microsoft Excel 2021; all analyses and visualizations were conducted in R (version 4.6.0). The 6,912 theoretical scenarios were obtained by crossing 48 E_{ini} -determining combinations (6 PROCs $\times$ 2 sectors of use (industrial/professional) $\times$ 2 LEV states $\times$ 2 fugacity levels) with 192 external modification-factor combinations (4 ventilation $\times$ 4 duration $\times$ 4 concentration $\times$ 3 RPE options), yielding 9,216 combinations. Next, 2,304 combinations not permitted as inputs in ECETOC TRA v3.2 (PROC 7 with professional use, 768; outdoors combined with LEV, 1,056; enhanced ventilation combined with LEV in professional use, 480) were excluded. Equivalently, the 44 valid E_{ini} -side combinations (48 minus the four PROC 7 combinations under the professional use) crossed with the 192 external combinations yielded 8,448, from which the 1,536 remaining ventilation-LEV conflicting combinations (1,056 + 480) were excluded, giving 6,912. A single-variable scenario for RPE was not designed, as respiratory protective equipment constitutes the lowest tier in the hierarchy of controls and its assigned protection factor is subject to substantial field-implementation uncertainty.

Abbreviations: ECETOC, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; TRA, Targeted Risk Assessment; PROC, process category; SU, sector of use; LEV, local exhaust ventilation; RPE, respiratory protective equipment; E_{ini} , initial exposure estimate; E_{inh} , inhalation exposure estimate; MF, modification factor; MW, molecular weight; TWA, time-weighted average; OAT, one-at-a-time; S_i , sensitivity index; IMS, improvement margin score; EI, effectiveness index; OEL, occupational exposure limit.

는 초기노출추정값(PROC, SU, LEV, Fugacity의 조합으로 결정), $MF_{vent} \cdot MF_{dur} \cdot MF_{conc} \cdot MF_{RPE}$ 는 각각 환기·작업시간·함유량·호흡보호구의 보정계수이다.

1) 1단계: 이론적 노출 공간의 구성과 현장 분포의 대비

개별 변수의 이론적 노출 영향을 다른 변수의 교란 없이 평가하기 위해 전수 조합(full factorial) 방식을 적용하였다. 현장 데이터에서 관찰된 6개 공정범주 (PROC 7, 8a, 8b, 13, 15, 19)를 대상으로, E_{ini} 결정 요인 즉 조합(PROC 6 $\times$ SU 2 $\times$ LEV 2 $\times$ Fugacity 2 = 48가지)과 외부 보정계수 즉 조합(환기 4수준 $\times$ 작업시간 4수준 $\times$ 함유량 4수준 $\times$ RPE 3수준 = 192

가지)을 교차하여 9,216가지의 전수 조합을 구성하였다. 이 중 ECETOC TRA v3.2에서 입력이 허용되지 않아 노출 추정치가 산출되지 않는 2,304가지를 제외하여 최종 6,912개의 이론적 시나리오를 확정하였다. 제외된 조합은 PROC 7이 산업적 용도에만 정의되어 Professional 설정과 결합할 수 없는 경우 768가지, 옥외 작업과 LEV를 병용할 수 없는 경우 1,056가지, Professional 설정에서 강화환기와 LEV를 병용할 수 없는 경우 480가지이다. 각 조합의 8시간 흡입노출 추정치는 $E_{inh}(mg/m^3) = E_{ini}(ppm) \times (MW/24) \times MF_{vent} \times MF_{dur} \times MF_{conc} \times MF_{RPE}$ 로 산출하였으며, MW/24는 ppm에서 mg/m^3 로의 변환 계수로서 ECETOC TRA

v3.2가 사용하는 20°C 기준 물 기체 부피(24 L/mol)를 반영한 값으로, 도구가 내부적으로 적용하는 값은 $5.475 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} / \text{ppm}$ 이다($131.39/24 = 5.474583$). 이론적 노출 공간과 현장 분포의 대비에는 Kolmogorov-Smirnov 검정을 적용하였다. 본 연구에서 ECETOC TRA 산출물 상호 간의 범주별 차이(예: PROC 13과 PROC 7의 추정치 차이)에 대해서는 결정론적 모델의 특성상 표본오차 개념이 성립하지 않으므로 유의성 검정을 적용하지 않았다(III-3 참조). 반면 Kolmogorov-Smirnov 검정은 모델 산출물 간 비교가 아니라, 357개 현장 시나리오가 6,912개 이론적 조합이 형성하는 기준 분포로부터 무작위로 추출된 것으로 볼 수 있는지를 검토하기 위한 일표본 적합도 검정(one-sample goodness-of-fit test)으로 사용하였다. 즉 귀무가설은 '국내 세척작업의 변수 조합이 이론적으로 가능한 노출 공간 전반에 고르게 분포한다'이며, 이를 기각함으로써 현장 분포의 구조적 편향을 뒷받침하고자 하였다. 다만 기준 분포가 이산적 조합 공간에서 도출된 경험분포이므로, 검정통계량 D는 두 분포 간 이격의 크기를 나타내는 보조 지표로 해석하였다.

2) 2단계: 모델 고유 민감도(S_i) 산출

식 1은 이산적 참조 테이블에 기반한 곱셈 구조이므로 편미분 기반의 전통적 민감도 분석이 부적절하며, E_{ini} 는 PROC·SU·Fugacity가 참조 테이블에서 단일 값으로 결합·조회된 뒤 LEV 감소계수(산업용 0.1, 전문가용 0.2)가 곱해지는 구조로 산출되므로, 네 요소 간 구조적 상호종속성이 존재한다. 이에 Riedmann et al.(2015)의 OAT(one-at-a-time) 민감도 분석 방법론을 적용하여 모델 민감도 지수(S_i)를 산출하였다(식 2).

$$S_i = \log_{10}(r_i) / \sum \log_{10}(r_i) \times 100 (\%) \quad (\text{식 } 2)$$

3) 3단계: 현장 개선여지(IMS) 및 노출감소 실효성 지수(EI) 산출

S_i 는 이론적 변동 범위만을 반영하여 현장에서 해당 변수가 실제로 어떤 값에 분포하는지를 고려하지 못한다. 이를 보완하기 위해 현장개선여지 점수(IMS)를 도입하였다. IMS는 357개 시나리오 각각의 현재 보정계수가 해당 변수의 최적값으로부터 얼마나 이격되어 있는지를 0-1 범위로 정규화한 후 전체 시나리오에 걸쳐

평균한 값이며(식 3), E_{ini} 복합변수는 각 시나리오의 E_{ini} 값을 전체 관찰 범위 내에서 로그 정규화하여 산출하였다.

$$IMS_i = \sum (\text{현재 보정계수}_k - \text{최적 보정계수}) / (\text{최악 보정계수} - \text{최적 보정계수}) / N \quad (\text{식 } 3)$$

여기서 k 는 개별 시나리오($k = 1, \dots, 357$), $N = 357$ 이며, 최적 보정계수란 해당 변수에서 노출이 가장 낮아지는 보정계수(즉 최소값)를, 최악 보정계수란 노출이 가장 높아지는 보정계수(즉 최댓값)를 의미한다. $IMS = 0$ 이면 모든 시나리오가 이미 최적 상태, $IMS = 1$ 이면 모든 시나리오가 최악 상태를 의미한다.

EI는 S_i 와 IMS의 곱으로 정의하였다(식 4).

$$EI_i = S_i \times IMS_i \quad (\text{식 } 4)$$

곱셈 결합을 채택한 이유는, 민감도가 높더라도 현장에서 이미 최적 상태($IMS \approx 0$)라면 추가 개선 여지가 없고, 반대로 개선여지가 크더라도 모델 민감도가 낮으면($S_i \approx 0$) 노출 감소 효과가 미미하므로, 두 조건이 동시에 충족될 때만 높은 우선순위가 부여되어야 하기 때문이다.

4) 4단계: 개선 시나리오 설계 및 시뮬레이션

S_i 및 EI 분석 결과를 바탕으로 8개의 노출 저감 시나리오를 설계하였다. 단일변수 시나리오(A, B, C, D, E, G)는 해당 변수만 최적 또는 현실적 최적 조건으로 치환하고 나머지를 현행 유지하는 구성으로, E_{ini} 복합변수의 하위 구성요소를 각각 조정하는 시나리오(A: PROC 밀폐화, B: LEV 전면 설치, E: Fugacity 저감)와 외부 보정계수를 조정하는 시나리오(C: 환기 개선, D: 작업시간 단축, G: 함유량 저감)로 구성된다. 현행 PROC 유지 복합 시나리오(F1: B+C+E, F2: B+C+E+G)는 공정범주를 변경하지 않는 조건에서 실현 가능한 대책의 복합적 효과를 검증한다. 시나리오 E에서 Fugacity 전환에 따른 E_{ini} 감소는 참조표상 공정범주별 실제 배율을 적용하였다. High Fugacity에 해당하는 85건은 PROC 13(Industrial) 81건과 PROC 7 4건으로, 각각 5배와 2배의 배율이 적용된다. 1/5을 일률적으로 적용할 경우 시나리오 각 산출평균 감소율은, E는 43.6%, F1은 88.3%(잔여 1건), F2는 92.9%(잔여 0건)로 산출되어 주요 결론에는 영향을 주지 않는다.

D(작업시간 단축)는 IMS가 0.135로 추가 효과가 미미하여 복합 시나리오에서 제외하였다.

한편 RPE는 EI 3위(13.2)로 이론적 개선 잠재력이 크게 산출되었으나, 단일변수 개선 시나리오를 설계하지 않았다. 호흡보호구는 위험성 관리의 계층(hierarchy of controls)에서 최하위 수단에 해당할 뿐 아니라, 착용물·밀착도·교체주기 등 현장 실행의 불확실성이 커지정보호계수(APF 20)가 그대로 실현된다고 보기 어렵다. 이러한 조건에서 RPE를 공학적 대책과 동일한 기준으로 시뮬레이션할 경우 이론적 감소율(최대 20배)이 실제 달성 가능한 저감 효과로 오인될 우려가 있어, 본 연구에서는 RPE를 개선 시나리오가 아닌 EI 분석 결과의 해석 대상으로만 다루고 그 실무적 함의는 고찰에서 별도로 논의하였다.

III. 연구결과

1. 연구대상 선정

1) 연구대상 자료

2018년부터 2022년까지 5개년간 수집된 TCE 8시간 TWA 측정 건수는 총 21,719건이었다. 이 중 불검출은 13,996건(64.4%), 노출기준 초과는 167건(0.77%)이었다(Jo et al., 2024). II-1에서 기술한 선정 절차에 따라 세척공정에 해당하며 ECETOC TRA 필수 입력변수의 인코딩이 가능한 자료를 정제한 결과, 최종적으로 338개소 357개 노출 시나리오가 확보되었다. 인코딩된 측정 건수는 4,402건이며, 이 중 측정값이 0인 2,107건(47.9%)을 제외한 검출치는 2,295건이다. 본 연구의 시뮬레이션은 357 ES 단위 추정치를 대상으로 하므로 검출치 건수는 자료 규모의 기술에 한정된다.

2. 노출변수 인코딩 결과

II-2의 인코딩 기준에 따라 분류한 357개 노출 시나리오의 변수별 일반적 특성은 Table 2와 같다.

인코딩 결과를 종합하면, 국내 TCE 세척작업의 전형적인 노출 시나리오는 '50인 미만의 소규모 사업장(79.0%)에서, 25% 초과 함유량의 TCE 단일 또는 고함량 세척제를, 담금 방식(PROC 13)으로, 실내에서 기본적인 환기 조건 하에, 15분-1시간의 간헐적 작업으로, 국소배기장치가 설치되어 있으나 호흡용 보호구는 미착용한 상태에서 사용하는 것'으로 요약할 수 있다. PROC 7(14건, 3.9%)은 담금 세척 후 세척 대상물에

잔류하는 세척제를 건조시키기 위해 압축공기 에어건을 사용하는 경우에 해당하며, 잔류 TCE가 고압 공기에 의해 비산되어 호흡역으로 흡입될 수 있으므로 ECETOC TRA의 PROC 7(산업적 스프레이) 정의에 부합하는 것으로 판단하였다.

357개 시나리오의 변수 조합을 분석하면, LEV 미설치(86건, 24.1%)와 High Fugacity(85건, 23.8%)가 상당한 비율을 차지하며, 두 조건이 동시에 출현하는 시나리오(18건)는 전수가 PROC 13에 집중되어, 담금 세척 공정에서 LEV 미설치와 가열 조건이 결합되는 구조적 고노출 패턴이 확인되었다. 가장 큰 빈도를 보이는 변수값이 PROC 13, Basic Ventilation, No RPE, '25%' 등 ECETOC TRA에서 고노출을 유발하는 변수값에 집중되어 있다는 점은, 국내 TCE 세척작업의 지배적 변수 조합 자체가 구조적으로 고노출 방향으로 편향되어 있음을 시사한다.

3. 노출변수별 영향 분석 및 구조적 노출 특성

본 절에서는 ECETOC TRA v3.2의 주요 입력 변수가 노출 추정치에 미치는 영향을 분석한다. 각 변수의 이론적 노출 영향을 다른 변수의 교란 없이 평가하기 위해 6,912개 이론적 시나리오를 생성하여 분석하였다. ECETOC TRA의 노출 추정치가 결정론적 모델의 산출물이므로, 범주 간 차이에 대한 통계적 유의성 검증은 적용하지 않는다. 따라서 동일 모델이 산출한 범주 간 차이(예: PROC 13과 PROC 7의 추정치 차이, Medium과 High Fugacity 간 차이)에 대해서는 통계적 유의성 검정을 적용하지 않고, 추정치의 변동 범위와 분포 양상을 기술적으로 비교하는 방식으로 분석하였다. 다만 III-3-2)에서 수행한 이론적 노출 공간과 현장 분포의 비교는 모델 산출물 상호 간의 비교가 아니라, 현장에서 관찰된 변수 조합의 집합이 이론적으로 가능한 조합 공간을 대표하는지를 검토하는 분포 수준의 비교이므로, 이에 한하여 적합도 검정을 적용하였다.

1) 개별 노출 변수별 노출 영향 분석

가. E_{ini} 내부 변수: PROC, Fugacity, LEV

전수 조합 분석에서 공정범주(PROC)별 중앙값은 PROC 15(0.66 mg/m^3) < PROC 8b(2.46) < PROC 13(3.83) < PROC 8a(4.79) = PROC 19(4.79) < PROC 7(8.21)의 순이었다. 동일 조건(SU·LEV·Fugacity 고정) 내에서 PROC 변경에 따른 E_{ini} 변동은 최대 약

Table 2. General characteristics of extracted data by variable (n = 357)

Variable	Category	n	Proportion (%)
PROC (Process Category)	PROC 13 (Treatment of articles by dipping and pouring)	206	57.7
	PROC 19 (Hand-mixing with intimate contact)	97	27.2
	PROC 15 (Use as laboratory reagent, small scale)	36	10.1
	PROC 7 (Industrial spraying)	14	3.9
	PROC 8b (Transfer at dedicated facilities)	3	0.8
	PROC 8a (Transfer at non-dedicated facilities)	1	0.3
Sector of use (SU)	Industrial	278	77.9
	Professional	79	22.1
Fugacity	Medium	272	76.2
	High	85	23.8
Ventilation type	Indoors – no or basic ventilation	234	65.5
	Indoors – good ventilation	102	28.6
	Indoors – enhanced ventilation	15	4.2
	Outdoors	6	1.7
Exposure duration	15 min – 1 hr	224	62.7
	< 15 min	100	28.0
	1 – 4 hr	22	6.2
	> 4 hr	11	3.1
Local exhaust ventilation (LEV)	Installed and operating (Yes)	271	75.9
	Not installed (No)	86	24.1
TCE content in mixture	> 25%	354	99.2
	5 – 25%	2	0.6
	1 – 5%	1	0.3
	< 1%	0	0.0
Respiratory protective equipment	No RPE	236	66.1
	RPE 95% (APF 20)	121	33.9
Workplace size (no. of workers)	< 50	282	79.0
	50 – 299	58	16.2
	≥ 300	17	4.8

Note: All counts are based on 357 exposure scenarios extracted from 338 workplaces; workplaces contributing multiple scenarios are counted repeatedly. Workplace size is not an ECETOC TRA input variable and is presented as a descriptive characteristic of the study population. Percentages may not sum to 100.0 due to rounding

10-25배에 달하며(예: Industrial/LEV Yes/Medium의 동일 조건에서 PROC 15의 1.00 ppm 대비 PROC 7의 25.00 ppm은 25배), E_{ini} 복합변수 전체($PROC \times SU \times LEV \times Fugacity$)로는 최대 500배(1.00-500.00 ppm)의 범위를 가진다. PROC이 노출의 '기저 수준'을 구조적으로 결정하며, 외부 보정계수는 이를 증폭하는 역할을 한다.

Fugacity가 Medium에서 High로 상승하면 동일 조건 내 E_{ini} 의 증가 배율은 공정범주와 사용부문(SU)에

따라 2-6배로 상이하여, PROC 13은 Industrial 5배·Professional 2.5배, PROC 8b는 Industrial 6배, PROC 7은 2배였다(ECETOC, 2012). 전수 조합에서도 High 그룹(중양값 5.75 mg/m³)이 Medium 그룹(중양값 1.53 mg/m³) 대비 약 3.8배 높았다. 작업 온도 관리에 의한 Fugacity 등급 전환은 의미 있는 제어 수단이나, 외부 보정계수(Ventilation, Duration, Concentration, RPE)의 변동 범위가 더 크기 때문에 두 그룹의 노출 분포는 부분적으로 겹치며, Medium 그룹에서도 LEV 미

설치·장시간 노출·고함량·RPE 미착용 등이 복합되면 노출기준 초과가 가능하였다(이론적 시나리오에서 Medium 224건, High 643건). 따라서 Fugacity 단독으로는 충분한 노출관리가 달성되기 어려우며, LEV 설치·환기 개선 등 다른 변수와의 복합적 관리가 필요하다.

LEV가 설치되면 E_{ini} 조회값에 산업용 0.1, 전문가용 0.2가 곱해진다. 전수 조합에서 설치군($n = 2,688$, 0.82 mg/m^3)과 미설치군($n = 4,224$, 5.75 mg/m^3)의 비는 약 1/7이었으나, 이는 두 군의 조합 수 차이(1,536건)와 외부 보정계수 구성 차이에 따른 혼합 효과이다. LEV 이외 변수를 고정한 짝지은 비교(2,688 쌍)에서 감소비 중앙값은 0.1·0.2로 모델 설정값과 일치하였다. E_{ini} 내부 세 하위 요인의 최대 변동 폭을 비교하면, PROC 선택에 따른 차이가 10-25배로 가장 크고, LEV 설치·미설치 간 차이(Industrial 10배, Professional 5배)와 Fugacity 등급 전환(PROC·사용 부문에 따라 2-6배)이 그 뒤를 따른다. 다만 이들 배율은 각 하위 요인에 독립적으로 부여된 계수가 아니라 참조표에서 조합 단위로 결정되는 값이므로, 서로 곱하여 전체 변동 폭을 유도할 수 없다. 예컨대 기준 조건인 PROC 7/Industrial/LEV Yes/Medium(25.00 ppm)에 LEV 미설치(10배)와 Fugacity 상승을 함께 적용할 경우, Fugacity 배율을 일률적으로 5배로 가정하면 1,250 ppm이 되지만, PROC 7의 실제 Fugacity 배율은 2배이므로 참조표상의 값은 500.00 ppm이며 이것이 본 연구에서 관찰된 6개 PROC 전체의 E_{ini} 최댓값에 해당한다(Table 3).

나. 외부 보정계수: Ventilation, Duration, Concentration, RPE

환기방식은 기본 환기(MF 1.0) 대비 향상된 환기(MF 0.3)에서 최대 3.3배의 변동을 보였다. 노출시간은 ' > 4 시간'(MF 1.0)에서 ' < 15분'(MF 0.1)으로 최대 10배의 변동을 보였으나, 357개 현장 시나리오의 90.7%가 이미 1시간 이내 작업이어서 추가 개선여지가 제한적이다. 함유량은 ' > 25%' (MF 1.0) 대비 ' < 1%' (MF 0.1)에서 최대 10배의 변동이 가능하며, 현장 시나리오의 99.2%가 ' > 25%'에 해당하여 이 변수가 현재 노출 수준을 구조적으로 높이는 데 기여하고 있다. RPE는 미착용(MF 1.0) 대비 APF 20(MF 0.05)에서 최대 20배의 변동을 보여 외부 보정계수 중 가장 큰 변동 범위를 가지나, 위험성 관리의 계층에서 최하위 수단에 해당하

며 현장 실행의 불확실성이 크다.

2) 이론적 노출 공간 대비 국내 세척작업의 위치

6,912개 이론적 전수 조합과 357개 현장 시나리오의 노출 추정치 분포를 비교하였다(Figure 1). 여기서 Kolmogorov-Smirnov 검정은 두 모집단의 평균 차이를 검정하기 위한 것이 아니라, 357개 현장 시나리오가 이론적 조합 공간이 형성하는 기준 분포로부터 무작위로 추출된 것으로 볼 수 있는지를 평가하는 적합도 검정으로 사용하였다. 즉 귀무가설은 '국내 세척작업의 변수 조합이 이론적으로 가능한 노출 공간 전반에 고르게 분포한다'이며, 검정 결과 이 가설은 기각되었다($D = 0.1578$, $p < 0.001$). 검정통계량 D 는 두 누적분포 간 최대 이격을 나타내는 지표로서, 현장 분포가 기준 분포로부터 체계적으로 이탈해 있음을 보여준다. 이론적 분포($n=6,912$)는 약 $0.0008\text{--}2,737.5 \text{ mg/m}^3$ 의 넓은 범위에 걸쳐 완만하게 분산되어 있는 반면, 현장 분포($n=357$)는 약 $3\text{--}10 \text{ mg/m}^3$ 부근에 밀도가 집중되어 있어(Figure 1), 국내 세척작업의 노출 분포가 이론적 저노출 영역을 활용하지 못하고 중·고노출 방향으로 구조적으로 편향되어 있음이 확인되었다. 현장 중앙값(5.48 mg/m^3)이 이론적 중앙값(2.96 mg/m^3)보다 약 1.9배 높아, 국내 세척작업이 이론적으로 가능한 저노출 영역을 충분히 활용하지 못하고 있음을 보여준다. 현장의 노출기준 초과율(12.6%)이 이론적 초과율(12.5%)과 유사한 것은, LEV 설치(75.9%)와 1시간 미만 단시간 작업(90.7%)이라는 저감 조건이 전체적 초과율을 억제하나, 원액 사용(99.2%), 기본 환기(65.5%), RPE 미착용(66.1%) 등의 고노출 조건이 잔존하여 이론적 전수 조합의 초과율 수준에서 벗어나지 못하고 있음을 의미한다.

4. 노출변수별 노출기여도 분석 및 개선효과 탐색

1) 모델 고유 민감도 분석(S_i)

II-3에서 정의한 OAT 민감도 분석(식 2)에 따라 각 변수의 모델 고유 민감도(S_i)를 산출하였다(Table 3).

본 연구에서는 TCE 세척작업의 맥락에 맞추어 E_{ini} 복합변수의 범위를 357개 시나리오에서 관찰된 6개 PROC의 전체 E_{ini} 범위인 1.00-500.00 ppm으로 설정하고 S_i 를 재산출하였다. Fugacity는 TCE의 물성상 Medium과 High의 2수준만이 실현 가능하므로, Riedmann et al.(2015)의 범용 분석과 달리 2수준만을 포함하였다. E_{ini} 는 PROC·SU·Fugacity의 테이블

Table 3. Effectiveness Index (EI = $S_i \times \text{IMS}$) and priority ranking by variable

Variable	E_{ini} composite* (PROC, SU, LEV, Fug)	Concentration	RPE	Ventilation	Duration
Option minimum (Optimal option: lowest exposure)	1.00 ppm (PROC 15, ind, LEV Yes, Med Fug)	0.1 ($< 1\%$: MF 0.1)	0.05 (RPE 95%: MF 0.05)	0.3 (Enhanced: MF 0.3)	0.1 (< 15 min: MF 0.1)
Option maximum (Worst-case option: highest exposure)	500.00 ppm (PROC 7, ind, LEV No, High Fug)	1 ($> 25\%$: MF 1.0)	1 (No RPE: MF 1.0)	1 (Basic: MF 1.0)	1 (> 4 hr: MF 1.0)
Field distribution characteristics	Majority at PROC 13 (206, 57.7%); 24.1% LEV No; 23.8% High Fug	99.2% at $> 25\%$ (MF fixed at 1.0)	66.1% not worn, 33.9% RPE 95%	65.5% Basic, 28.6% Good, 4.2% Enhanced, 1.7% Outdoors	28.0% < 15 min, 62.7% 15 min–1 hr
r_i (max/min)	500	10	20	3.33	10
$\log_{10}(r_i)$	2.699	1	1.301	0.5229	1
S_i (%)	41.4 [†]	15.3	19.9	8.0	15.3
IMS [‡]	0.429 [§]	0.995	0.661	0.828	0.135 [¶]
EI ($S_i \times \text{IMS}$) ^{**}	17.7	15.3 ^{††}	13.2 ^{††}	6.6 ^{††}	2.1
Rank	1	2	3	4	5

Note: Total S_i = 99.9% (100.0% before rounding; components are rounded to one decimal place), Total EI = 54.9. r_i recalculated using the E_{ini} range determined by the six PROCs observed in 357 TCE cleaning scenarios (1.00–500.00 ppm); external modification factor ranges are the full option ranges provided by ECETOC TRA v3.2.

* Within the E_{ini} composite, PROC selection (up to 10–25 $\times$ under identical SU/LEV/Fugacity conditions), LEV installation (10 $\times$ for Industrial, 5 $\times$ for Professional), and fugacity level (2–6 $\times$, depending on PROC and sector of use; e.g., 2 $\times$ for PROC 7, 6 $\times$ for PROC 8b in the industrial use, and 5 $\times$ for PROC 13 in the industrial use but 2.5 $\times$ in the professional use) are the primary drivers. PROC, SU and fugacity jointly determine the single E_{ini} value retrieved from the lookup table, whereas LEV, although part of the lookup key, does not alter the retrieved value: its effect is applied as a separate multiplicative reduction factor (0.1 industrial, 0.2 professional). Because the three lookup dimensions are interdependent within one table entry and their multipliers are not mutually multiplicative, they cannot be decomposed into independent sensitivity indices. The composite maximum of 500.00 ppm corresponds to PROC 7/Industrial/LEV No/High fugacity. PROC 7 is defined only for the industrial sector of use in ECETOC TRA v3.2 and cannot be combined with the professional use; the composite maximum therefore necessarily occurs in the industrial use.

[†] S_i for E_{ini} composite = 41.4%, calculated from $\log_{10}(500) = 2.699$ as a proportion of total $\log_{10}(r_i)$ sum (6.523).

[‡] IMS: normalized distance of the current field average from the optimal option level, scaled 0–1. Higher IMS = greater room for improvement. IMS is not the ECETOC TRA modification factor itself: the tool's default factors (e.g., 1.0, 0.6, 0.2 and 0.1 for duration and concentration) are rescaled to the 0–1 interval defined by the optimal and worst-case options of each variable, so that IMS values are comparable across variables with different factor ranges. Outdoor scenarios ($n = 6$) were assigned the same modification factor as good ventilation (MF 0.7) in the IMS calculation.

[§] E_{ini} composite IMS calculated by log-normalizing each scenario's E_{ini} value within the observed range (1.00–500.00 ppm).

^{||} IMS 0.995 indicates nearly all scenarios (99.2%) use undiluted TCE.

[¶] IMS 0.135 reflects 90.7% of scenarios already ≤ 1 hr.

^{**} Higher EI = higher intervention priority. EI was computed from unrounded S_i and IMS values and then rounded to one decimal place, whereas S_i and IMS are displayed rounded to one and three decimal places, respectively; recomputing EI from the displayed values may differ by up to ± 0.1 .

^{††} Concentration (EI 2nd) and RPE (EI 3rd) require fundamental measures (alternative cleaning agents, mandatory RPE programs) given that 99.2% use undiluted TCE and 66.1% do not wear RPE.

^{††} Ventilation (EI 4th): low S_i but high IMS, indicating value as a readily implementable supplementary measure.

조회값에 LEV 감소계수가 곱해지는 구조로 산출되어 네 요소가 상호종속적으로 작동하므로 Riedmann et al.(2015)의 원 방법론에 따라 E_{ini} 를 하나의 복합변수로 유지하여 S_i 를 산출하였다.

TCE 세척작업의 S_i 순위는 E_{ini} 복합(41.4%) $>>$ RPE(19.9%) $>$ Duration(15.3%) $\approx$ Concentration

(15.3%) $>$ Ventilation(8.0%)이었다. Riedmann et al.(2015)의 일반적 순위와 비교하면, E_{ini} 복합변수가 최대 기여를 한다는 큰 틀은 일치한다. 다만, S_i 는 모델의 변수 옵션 범위에만 의존하는 이론적 지표로서, 현장에서 각 변수가 실제로 어떤 값에 분포하고 있는지와는 무관하다. RPE(S_i 2위)와 Concentration(S_i 공동 3

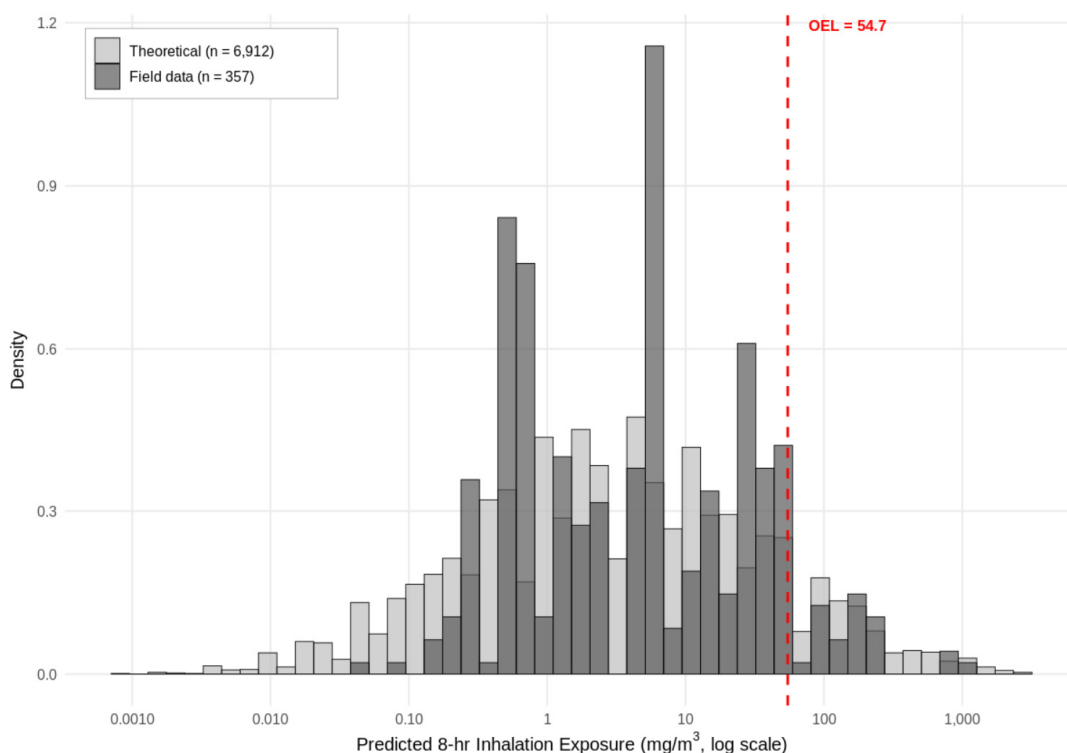


Figure 1. Distribution of estimated inhalation exposure

위)은 현장에서 사실상 고노출 옵션에 고정(원액 사용 99.2%, RPE 미착용 66.1%)되어 있어 조정 시 노출 저감 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

한편, E_{ini} 내부에서 PROC 전환과 LEV 설치의 변동 범위가 큰 변수이나, 실현가능성에서 차이가 있다. PROC 전환은 공정 자체의 근본적 변경을 수반하므로 단기적 현장 적용이 제한적인 반면, LEV 설치의 기존 공정을 유지한 상태에서도 실현 가능하다. Fugacity 저감(작업 온도 관리)은 설비 투자 부담이 적으나, 할로겐화 용제 세척에서 가열은 세정력뿐 아니라 건조 기능의 핵심 요소이므로 온도를 낮추면 별도의 건조 공정 추가가 필요할 수 있어 공정 조정이 수반된다(ACGIH, 2019; Slunge et al., 2022).

2) 현장 개선여지(IMS) 및 노출감소 실효성 지수(EI)

II-3에서 정의한 IMS(식 3)와 EI(식 4)를 357개 시나리오에 적용한 결과는 Table 3 및 Figure 2와 같다.

Figure 2는 각 변수의 S_i (X축)와 IMS(Y축)를 이차원 공간에 배치한 버블 차트로, 버블의 크기와 색상의 명도가 EI에 비례한다. EI 분석의 핵심적 발견은 다음 세 가지로 요약된다. 첫째, E_{ini} 복합변수는 EI가 17.7로 1

위이며, 모델 민감도(41.4%)와 현장 개선여지(IMS 0.429) 모두가 상당하여 공학적 대책(PROC 전환, LEV 설치, Fugacity 저감)이 최우선 개선 대상이 된다. 둘째, Concentration(EI 15.3, 2위)과 RPE(EI 13.2, 3위)는 현장이 거의 전수 최악조건 상태에 있기 때문에 EI가 높으며, 이 두 변수를 조정하려면 대체 세정제 도입이나 의무적 RPE 프로그램 등 근본적 조치가 필요하다. 이는 기존 민감도 분석만으로는 드러나지 않았던 ‘현장 맥락 특이적’ 정보이다. 셋째, Ventilation(EI 6.6, 4위)은 모델 민감도는 낮으나 IMS가 0.828로 높아, 실행이 용이한 보조적 수단으로서의 가치가 높다. 한편, Duration(EI 2.1, 5위)은 이미 90.7%가 1시간 이내 작업이어서 추가 효과가 제한적이다.

3) 고기여 변수 조정에 따른 노출감소 시뮬레이션

II-3에서 설계한 8개 개선 시나리오(Table 4)에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

기준선(Baseline)의 357개 시나리오 노출분포는 중앙값 5.48 mg/m³, 산술평균 27.4 mg/m³, 최대값 958.1 mg/m³이며, 노출기준(10 ppm = 54.75 mg/m³) 초과 시나리오는 45건(12.6%)이었다.

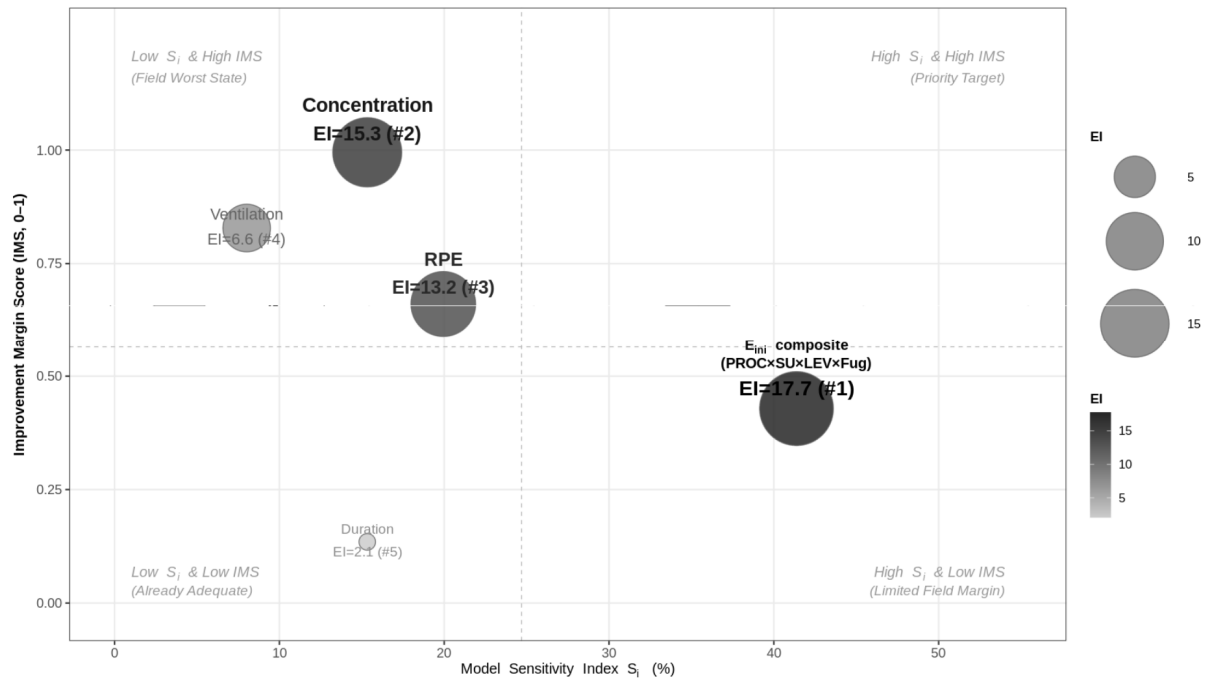


Figure 2. EI bubble chart of model sensitivity (S_i) vs field improvement margin (IMS)

시나리오 A (PROC 밀폐화): 357건 전체에 대해 PROC를 PROC 3(밀폐 배치공정)으로 전환하였다. 밀폐형 PROC 3의 E_{ini} 가 개방형 PROC에 비해 구조적으로 낮게 설정되어 있어(공정범주·사용부문에 따라 2.5-25배 감소), 산술평균이 27.4 → 5.27 mg/m³로 80.8% 감소하고, 노출기준 초과가 45 → 7건으로 축소되었다. LEV가 설치된 271건은 전수 해소되는 반면, LEV 미설치 86건 중 7건(PROC 13 5건, PROC 19 2건)이 여전히 노출기준을 초과하는 것으로 추정되었다. 실제 밀폐형 세척장비(ECSA Type IV 이상)에는 LEV가 구조적으로 내장되어 있으므로(NEWMOA, 2001; ECSA, 2021), PROC 전환과 LEV 설치의 현실적으로 동시에 수반되는 조합이다. 한편, PROC 15에 해당하는 36건은 전수가 Professional 설정으로, 이 조건에서는 PROC 3의 E_{ini} 가 PROC 15보다 오히려 높게 설정되어 있어 시나리오 A 적용 시 해당 건의 추정 노출이 증가한다. 다만 이들 36건은 모두 절대 수준이 낮아 노출기준 초과에는 이르지 않으므로 전체 감소율(80.8%)의 방향성에는 영향을 주지 않는다. 이는 PROC 밀폐화가 모든 공정범주에서 일률적으로 유효한 것은 아님을 보여주며, 실무 적용 시 PROC별 전환 적합성을 사전에 검토해야 한다.

시나리오 B (LEV 전면 설치): 미설치 86건에 LEV를 설치하면 해당 건의 노출이 산업용 83건은 1/10로, 전문가용 3건은 1/5로 감소하며, 전체 산술평균이 68.6% 감소하였다. 다만 노출기준 초과는 45 → 12건으로, LEV 단독 적용만으로는 모델 추정상 초과 사례가 모두 해소되지는 않았다. 그럼에도 LEV 미설치 86건이 고농도 영역에 해당하여 적용 대상이 한정됨에도 전체 평균 감소에 대한 지렛대 효과가 극적이며, PROC 전환이 현실적으로 어려운 사업장에서 가장 효과적인 단일 공학적 대책이다.

시나리오 C (환기 개선): Basic Ventilation 234건을 Good Ventilation(MF 0.7)으로 전환하면 해당 건의 노출이 30% 감소하나, 전체 산술평균 감소율은 20.6%에 그쳤으며, 노출기준 초과는 45건에서 26건으로 감소하였다. 단독 효과는 제한적이나 실행이 용이하여 보조적 수단으로서의 가치가 높다.

시나리오 D (작업시간 단축): 257건을 '＜ 15분'(MF 0.1)으로 단축하면 전체 산술평균 64.1% 감소, 노출기준 초과 45 → 13건이었다. 이 값이 시나리오 B(68.6%)에 근접하지만, 적용 대상의 대다수인 '15min-1hr' 224건의 감소 폭이 1/2에 그쳐 건당 평균 감소 배율이 시나리오 B보다 작다. 이미 90.7%가 1시간 이내 작업

Table 4. Improvement simulation scenario design and results

Scenario	Adjusted variable	EI rank	Current status (Before)	Improvement (After)	Mean reduction (%) [*]	Residual OEL [†] exceedances (n)
Baseline	—	—	Current field distribution (n = 357)	—	—	45
A [‡]	PROC	1 st -E _{ini} composite (EI 17.7), PROC component	PROC 13 in 206 cases (57.7%), PROC 19 in 97 (27.2%)	All six observed PROCs (7, 8a, 8b, 13, 15, 19) → PROC 3 (n = 357)	80.8	7
B [§]	LEV	1 st -E _{ini} composite (EI 17.7), LEV component	86 cases (24.1%) without LEV	LEV installed (MF 0.1 for industrial, 0.2 for professional)	68.6	12
C	Ventilation	4 th (EI 6.6)	234 cases (65.5%) basic ventilation	→ Good ventilation (MF 0.7)	20.6	26
D	Duration	5 th (EI 2.1)	257 cases (72.0%) ≥ 15 min	→ < 15 min (MF 0.1)	64.1	13
E	Fugacity	1 st -E _{ini} composite (EI 17.7), Fugacity component	85 cases (23.8%) high fugacity	→ Medium fugacity	42.9	35
G	Concentration	2 nd (EI 15.3)	354 cases (99.2%) > 25%	→ 5-25% (MF 0.6)	39.7	19
F1 [¶]	LEV + Vent + Fug	Combined	As above	Simultaneous B + C + E	87.8	2
F2 ^{**}	LEV + Vent + Fug + Conc	Combined	As above	Simultaneous B + C + E + G	92.6	0

Note: PROC, LEV, and Fugacity are sub-components of the E_{ini} composite (EI rank 1st); addressed as separate scenarios to evaluate individual potential. Scenarios B, D, and E shift the target cases to the optimal option of each variable, whereas C (basic → good, not enhanced) and G (> 25% → 5-25%, not < 1%) represent partial improvements constrained by field feasibility; mean reduction values are therefore not directly comparable with EI ranking.

* Mean reduction (%) = (Baseline mean - Scenario mean) / Baseline mean × 100.

† OEL = 54.75 mg/m³ (10 ppm × 5.475 mg·m⁻³/ppm).

‡ Scenario A requires complete equipment replacement to enclosed process (PROC 3). The 7 residual OEL exceedances (PROC 13, 5; PROC 19, 2) all arise from LEV-uninstalled cases; when Scenario A is combined with Scenario B, all model-estimated exceedances would be eliminated.

§ LEV efficiency factors 0.1 (industrial, n = 83) and 0.2 (professional, n = 3) applied to the 86 currently uninstalled cases.

|| Scenario G is exploratory; TCE cleaning efficacy depends on solvent concentration.

¶ D excluded from combined scenarios: IMS 0.135 limits marginal effect. Single-variable effectiveness ranking by mean reduction: A (80.8%) > B (68.6%) > D (64.1%) > E (42.9%) > G (39.7%) > C (20.6%). F1 residual exceedances: ES269 (PROC 7 / ind / yes / high) and ES300 (PROC 7 / ind / yes / medium), both E_{inh} = 57.49 mg/m³.

** F2 adds G to F1 to explore theoretical upper bound

(IMS 0.135)이어서 추가 개선여지가 제한적이며, 작업 시간 단축은 생산성과 직결되므로 실현가능성도 제한적이다.

시나리오 E (Fugacity 저감): High Fugacity 85건을 Medium으로 전환하면 PROC 13(Industrial) 81건은 E_{ini}가 1/5로, PROC 7 4건은 1/2로 감소하여, 전체

산술평균 42.9% 감소, 노출기준 초과 45 → 35건이었다. 세척조 냉각장치, 뚜껑 설치, 온도 모니터링 등으로 구현 가능하나, 건조 공정 변경에 따른 부수적 영향 평가가 필요하다.

시나리오 G (함유량 저감): '> 25%' (MF 1.0)인 354건을 '5-25%' (MF 0.6)로 전환하면 전체 산술평균

39.7% 감소, 노출기준 초과 45 → 19건이었다. TCE의 세정력이 농도에 비례하므로 단순 희석이 아닌 대체 세정제 도입과 연계하여 검토해야 한다. 이 시나리오는 EI 2위 변수의 이론적 잠재력을 확인하는 탐색적 시나리오로서, 복합 시나리오 F2의 설계 근거를 제공한다.

시나리오 F1 (복합: B+C+E): 세 변수의 보정계수가 곱셈으로 작용하여 산술평균이 87.8% 감소하고, 노출기준 초과가 45 → 2건으로 대폭 감소하였다.

시나리오 F2 (확장 복합: B+C+E+G): F1에 함유량 저감을 추가하면 산술평균 92.6% 감소, 모델 추정상 노출기준 초과 사례가 0건으로 산출되었다. F1에서 2건 잔존하던 노출기준 초과사례가 함유량 저감(MF 1.0 → 0.6)의 추가 적용으로 해소된 것이다. F1 대비 개선 후 산술평균 노출량 기준으로는 3.35 → 2.02 mg/m³로 약 39.7%의 추가 저감에 해당한다.

시뮬레이션 결과의 요약은 Table 4에 제시하였다. Baseline에서 IQR이 0.77-27.38 mg/m³(범위 폭 26.61 mg/m³)이던 것이 시나리오 F2에서 0.23-2.30 mg/m³(범위 폭 2.07 mg/m³)로 축소되어, 복합 개선이 분포의 중심뿐 아니라 산포도 자체를 구조적으로 압축시킴을 확인하였다.

4) 개선효과와 실무적 해석

ECETOC TRA의 곱셈 구조에서는 복수의 변수를 동시에 개선할 경우 효과가 승법적(multiplicative)으로 확대된다. 예컨대, 산업용 LEV 설치($\times 0.1$) + Fugacity 저감($\times 0.2$) + 환기 개선($\times 0.7$)을 동시에 적용하면 이론적으로 해당 건의 노출이 0.014배로 감소할 수 있다(시나리오 F1). 다만 이 배율은 참조표상 공정범주와 사용부문에 따라 달라지므로, 본 연구의 시뮬레이션에서는 각 시나리오에 해당하는 실제 배율(LEV는 Industrial $\times 0.1$ ·Professional $\times 0.2$, Fugacity 저감은 대상 85건의 구성에 따라 PROC 13 Industrial $\times 0.2$ 와 PROC 7 $\times 0.5$)을 개별적으로 적용하였다. 실제 F1(87.8%)과 F2(92.6%)의 감소율이 이론적 최대치에 미치지 못하는 것은, 357개 시나리오 중 상당수가 이미 LEV 설치(75.9%), Medium Fugacity(76.2%), Good 이상 환기 및 옥외(34.5%) 상태여서 추가 변동이 없는 건이 포함되기 때문이다.

EI 분석과 시뮬레이션 결과를 종합하여 개선방안을 세 단계로 구조화하였다. 1단계(E_{ini} 내부 조정, 공학적 대책)로서 PROC 밀폐화(시나리오 A, 산술평균 80.8%

감소)가 단일변수 중 가장 효과적이며, LEV 설치(시나리오 B, 산술평균 68.6% 감소)는 PROC 전환이 당장 불가능한 사업장에서 즉시 시행 가능한 가장 효과적인 대책이고, 온도관리(시나리오 E, 산술평균 42.9% 감소)는 냉각장치 설치 등으로 구현 가능하다. 2단계(외부 보정계수 조정)로서 환기 개선(시나리오 C)은 보조적 수단으로, 함유량 저감(시나리오 G)은 대체 세정제 도입과 연계하여 검토할 가치가 있다. 3단계(복합 적용)로서 F1(산술평균 87.8% 감소, 초과 2건)과 F2(산술평균 92.6% 감소, 초과 0건)는 PROC 전환 없이도 복합적 비PROC 개입으로 모델 추정상 노출기준 준수 수준에 도달할 수 있음을 보여준다.

본 결과를 선행연구와 비교하면, Kim et al.(2019)은 PROC과 환기방법이 ECETOC TRA 모델 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 주요변수임을 확인하였고, Jeong et al.(2021)은 디클로로메탄을 대상으로 PROC 선택과 LEV가 핵심 변수임을 실증한 바 있다. 다만, 두 연구 모두 변수별 개선 시나리오를 설계하여 노출저감 효과를 시뮬레이션하지는 않았다는 점에서 본 연구의 차별성이 있다.

IV. 고찰

1. 노출변수 민감도 분석 및 EI 분석 결과의 의의

본 연구는 ECETOC TRA v3.2의 노출량 추정 구조를 활용하여 OAT 민감도 분석을 수행하고, 모델 고유 민감도(S_i)와 현장 개선여지 점수(IMS)를 결합한 EI를 도입함으로써 ‘이론적 중요성’과 ‘실무적 개선 잠재력’을 동시에 고려한 통합 우선순위를 제시하였다. EI 분석의 핵심적 발견은, E_{ini} 복합변수가 EI 1위(17.7)로서 공학적 대책이 최우선 과제임이 재확인된 것, Concentration(EI 2위)과 RPE(EI 3위)가 이론적 EI는 높으나 대체 세정제 도입이나 의무적 RPE 프로그램 등 근본적 조치가 수반되어야 실현 가능하다는 점, 그리고 Ventilation(EI 4위)이 모델 민감도는 낮으나 현장 개선여지가 크다는 점이다.

이러한 발견은 실무적으로 중요한 시사점을 갖는다. 일반적 민감도 분석에서는 RPE(S_i 19.9%)와 Concentration(S_i 15.3%)이 높은 이론적 기여도를 보이므로 호흡보호구 지급이나 희석 사용이 우선 권고될 수 있다. 그러나 TCE 세척작업에서는 이 두 변수가 거의 전수 최악 조건에 고정되어 있어, 이론적 민감도가

그대로 실현 가능한 개선 효과로 전환되지 않는다. 따라서 E_{ini} 복합변수를 구성하는 공학적 대책에 자원을 집중해야 하며, 동시에 EI 분석은 공학적 대책이 즉시 실현 불가능한 사업장에 대해 과도기적 관리 방안의 근거도 제공한다.

본 연구의 민감도 분석 결과를 Riedmann et al.(2015)이 ECETOC TRA v3, Stoffenmanager 4.5, ART 1.5의 세 모델에 대해 수행한 비교 민감도 분석과 대조하면, ECETOC TRA에서는 E_{ini} 가 전체 노출 스코어의 42-48%를 차지하여 단일 변수 중 가장 지배적인 반면, Stoffenmanager 4.5에서는 고유배출·취급방식·확산·분리 등이 비교적 균등하게 기여하여 “가장 균형 잡힌” 구조를 보였고, ART 1.5에서는 발생원 구획이 전체 노출 범위의 약 75%를 차지하여 발생원 특성화에 대한 의존도가 가장 높았다. 이러한 구조적 차이는 실무적으로 ECETOC TRA에서 PROC 분류 오류가 큰 영향을 미치며, Stoffenmanager는 입력 정보의 불확실성이 큰 상황에서 보다 견고한 추정치를 제공할 수 있고, ART는 발생원 특성화가 정확할 때 최고 정밀도를 제공하나 관련 입력이 불확실할 경우 변동 폭이 매우 클 수 있음을 시사한다. 세 모델 모두에서 공통적으로 발생원 관련 변수가 최대 기여자라는 점은, 본 연구의 “공학적 대책이 최우선”이라는 결론이 특정 모델에 한정되지 않는 일반적 타당성을 갖는 근거를 제공한다.

한편 EI 순위와 단일변수 시뮬레이션의 노출 산술평균 감소율은 반드시 일치하지 않는다. Duration은 EI가 2.1로 최하위이나 시나리오 D의 산술평균 감소율은 64.1%로, EI 순위가 더 높은 Concentration(EI 2위, 시나리오 G 39.7%)이나 Ventilation(EI 4위, 시나리오 C 20.6%)을 상회한다. 이러한 외견상의 역전은 시나리오의 개선 정도가 대상변수마다 동일하지 않기 때문이다. 시나리오 D는 대상 257건 전체를 해당 변수의 최적 옵션(‘15분 미만’, MF 0.1)으로 치환하는 완전 최적화인 반면, 시나리오 C는 Basic(MF 1.0)에서 최적값인 Enhanced(0.3)가 아니라 Good(0.7)으로, 시나리오 G는 ‘> 25%’(1.0)에서 최적값인 ‘< 1%’(0.1)가 아니라 ‘5-25%’(0.6)로 이동시키는 부분 개선이다. 이는 국내 사업장의 환기설비 개선 여건과 TCE의 세정력이 농도에 의존한다는 제약을 각각 반영한 설계로서, 해당 변수가 가진 이론적 잠재력의 일부만을 실현한 값이다. 실제로 세 시나리오의 대상변수를 각각 최적 옵션까지 이

행시키면 감소율은 Concentration 89.9%, Ventilation 65.0%, Duration 64.1%로 산출되어 EI 순위(15.3 > 6.6 > 2.1)와 동일한 순서를 보인다(Ventilation의 최적 이행은 전문가용 LEV 설치 사업장에서 ‘Enhanced Ventilation’과 LEV의 병용이 모델에서 허용되지 않아 해당 건물은 ‘Good Ventilation’까지만 적용한 값이다). 즉 시나리오 D는 이미 해당 변수의 최대 저감 수준에 도달한 설계인 반면, 시나리오 C와 G는 각각 44.4%p와 50.2%p의 저감 여지를 남긴 부분 개선이다. 다만 Ventilation과 Duration의 최대 저감률은 0.9%p 차이로 근소하므로, EI의 서열이 감소율의 크기 차이까지 그대로 반영하는 것은 아니다. 즉 EI 순위와 시뮬레이션 결과의 불일치는 실현가능성을 고려한 차등 개선설정에서 비롯된 것이다. 따라서 EI는 변수의 전체 옵션 범위에 걸친 개선 잠재력을 나타내는 사전적 지표인 반면, 시뮬레이션의 평균 감소율은 실현가능성을 반영한 사후적 지표로서 상호 보완적으로 해석되어야 한다. Duration의 사례는 EI가 낮은 변수라도 완전 최적화를 가정하면 큰 감소율이 산출될 수 있음을, Concentration의 사례는 EI가 높은 변수라도 실현 가능한 개선 폭이 제한되면 감소율이 작게 나타날 수 있음을 보여준다. 다만 Duration은 이미 90.7%가 1시간 이내 작업이고 작업시간 단축이 생산성과 직결되어 실현가능성이 제한적이므로, 시뮬레이션상의 높은 감소율이 곧 개선 우선순위를 의미하지는 않는다. 이러한 점에서 변수의 개선 여지와 모델 민감도를 함께 고려하는 EI 기반 우선순위는 유효하며, 시뮬레이션 결과는 각 대책이 어느 수준까지 실현되었을 때의 효과인지를 함께 명시하여 해석할 필요가 있다.

2. 개선 시뮬레이션 결과의 실현가능성 고찰: EI 우선순위에 기반한 검토

1) 공정 변경: 개방형 담금(PROC 13)에서 밀폐형 시스템으로의 전환

시나리오 A에서 산출된 노출 산술평균 80.8% 감소 및 노출기준 초과 84.4% 감소(45 → 7건)는, 개방형에서 밀폐형으로의 공정 전환이 갖는 노출 저감 잠재력을 모델 추정 수준에서 정량적으로 보여주며, EU REACH에서 TCE 사용을 밀폐형 시스템으로 제한한 규제 결정의 기술적 타당성과도 부합한다.

유럽연합에서는 TCE의 산업용 세척이 REACH Annex XIV 허가 대상으로 지정되어 밀폐형 증기탈지

시스템(ECSA Type IV 또는 V) 내에서만 사용이 허가되고 있다(European Commission, 2018). ECSA는 염소계 용매 세척장비를 밀폐도에 따라 Type I-II(개방형), Type III(배기구를 갖춘 반밀폐형), Type IV(활성탄 필터를 갖춘 밀폐형), Type V(진공 건조 방식의 밀폐형)로 분류하며, Type IV 이상에는 LEV가 구조적으로 내장되어 있다(ECSA, 2021; Slunge et al., 2022). 미국 EPA는 TCE 최종규정에서 잠정 노출기준(interim ECEL) 0.2 ppm을 준수할 경우 규제 이전의 작업장 만성 노출수준이 약 97% 감소할 것으로 추정하였으며, 이는 공학적 대책을 우선 적용하는 위험성 관리의 계층(hierarchy of controls) 이행을 전제로 한 값이다(U.S. EPA, 2024b). 미국 EPA는 2024년 12월 최종규칙에서 TCE의 대부분 용도를 금지하면서, 증기탈지에 대해서는 밀폐형 시스템 하에서만 제한적 사용을 허용하고 작업장 공기 중 농도를 0.2 ppm(8시간 TWA) 이하로 유지하도록 요구하고 있다. EU REACH 인가결정(C(2018) 5057)에서도 Blue Cube Germany Assets GmbH & Co. KG에 대해 밀폐형 시스템에서만 TCE를 사용하도록 조건을 부과하였고, 엄격한 허가조건으로 인해 대다수 기업이 TCE 사용을 중단하여 실제 허가를 활용한 기업은 650개 이상의 하위사용자 중 38곳에 불과하였다(Andersson & Slunge, 2021; Slunge et al., 2022).

이에 반해, 본 연구의 국내 데이터에서는 밀폐형 PROC(PROC 2, 3)에 해당하는 시나리오가 단 한 건도 관찰되지 않았으며, PROC 13(개방 담금)과 PROC 19(수작업)가 합계 84.9%를 차지한다. 밀폐형 시스템 도입의 장점은 용제 증기의 외부 확산을 구조적으로 차단하여 작업자 노출과 환경 배출을 동시에 저감하고 용제 회수·재사용률을 높일 수 있다는 점이며(NEWMOA, 2001; ECSA, 2021), 단점으로는 초기 설비 투자비용과 소규모 사업장에서의 설치 공간 확보 어려움 등이 있다(Slunge et al., 2022). 유럽 금속부품 세척 사업장 조사에서 기존 염소계 용제 설비를 개조하는 비용은 4,000-25,000 유로였으나, 대체 용제(수정 알코올)용 신규 설비는 100,000-800,000 유로, 수계 세척 설비는 300,000-1,000,000 유로로 보고되었다(Slunge et al., 2022). 국내 TCE 세척 사업장의 상당수가 50인 미만 소규모 사업장임을 고려하면, 정부 보조금 지원이나 단계적 전환 프로그램을 통한 중장기적 추진이 필요하다.

한편, 본 연구에서 PROC 7로 분류된 14건은 담금 세척 후 에어건 건조 작업에 해당하는데, 밀폐형 시스템에서는 세척·건조 전 과정이 밀폐 챔버 내에서 수행되므로, PROC 전환이 전체 작업 사이클의 노출을 근본적으로 차단한다는 점에서 의의가 크다.

2) 대체 세정제 도입: Fugacity 변수의 근본적 전환

시나리오 E에서 Fugacity를 High → Medium으로 전환하면 산술평균 42.9%의 노출 감소를 달성하였다. 보다 근본적으로는 TCE(증기압 7.8 kPa)를 증기압이 낮은 물질로 대체하면 Fugacity 등급 자체가 하향되어 E_{ini} 가 구조적으로 감소한다. 대체 옵션으로는 수계 세정제, 변성 알코올, 불소계 용매(HFE, HFO 계열) 등이 있으며, Massachusetts주 OTA 사례에서 Inner-Tite Corporation이 TCE 기반 증기탈지를 수계 세정으로 전환하여 작업자 노출을 사실상 제거한 것으로 보고되었다(Massachusetts OTA, 2012). Slunge et al.(2022)은 유럽 금속부품 세척 분야의 TCE 인가 대상 하위사용자 650개소 이상 중 실제로 인가를 활용한 기업은 38개소에 불과하였고, 대다수가 2016년 일몰기한 이전에 TCE를 대체하였음을 보고하였다. 다만 조사 대상 19개소 중 14개소가 화학구조가 유사한 PERC 또는 메틸렌클로라이드로 전환하여 기존 설비를 계속 사용하였고, 근본적 대체(수정 알코올·수계 세척)로 전환한 사례는 3개소에 그쳐, 물질 단위 규제가 공정 수준의 노출 저감으로 곧바로 이어지지는 않는다는 점도 함께 지적되었다. 다만, 대체 세정제는 세정력(특히 정밀 부품), 건조 시간, 폐수 처리 비용 등에서 TCE에 비해 단점이 있을 수 있어 공정별 적합성 평가가 선행되어야 한다.

ECETOC TRA 변수 관점에서 대체 세정제 도입은 Fugacity 등급 변경뿐 아니라 해당 물질의 노출기준 차이도 고려해야 한다. 변성 알코올의 노출기준은 TCE (10 ppm)보다 수십 배 높은 경우가 많아, 동일 노출농도에서도 노출기준 대비 노출농도의 비(RCR)이 크게 낮아져 ‘물리적 노출량 감소’와 ‘독성학적 위험도 감소’의 이중적 개선효과를 기대할 수 있다.

3) LEV 설치: 높은 단일 변수 개선효과

시나리오 B에서 미설치 86건에 LEV를 설치하면 전체 산술평균 68.6% 감소를 달성하였다. ECETOC TRA v3.2에서 LEV의 효율은 산업용 90%(감소계수 0.1), 전문가용 80%(감소계수 0.2)로 일괄 설정되어 있

다. 이 값은 v3.1에서 일부 PROC(7, 8b)에 부여되던 더 높은 효율(각각 95%, 90%)을 실측·모델 비교 결과에 따라 하향 조정한 것으로, ECETOC의 기술보고서에 근거한 도구 기본값이다(ECETOC, 2023). 따라서 본 연구의 LEV 효과는 특정 사업장의 실측 저감률이 아니라 도구 내 고정계수를 반영한 값이다. 적절히 설계·운영될 경우 증기탈지 공정에서 85-95%의 포집 효율을 달성할 수 있다(ACGIH, 2019). 미설치 24.1%의 사업장이 구조적 고노출 조합에 집중되어 전체 노출 분포를 크게 왜곡하고 있으므로, LEV 설치 의무화가 세척작업 전체의 노출수준을 구조적으로 개선하는 가장 효과적인 단일 정책이다.

4) 함유량 및 사용량 조정: EI 2위 변수의 실무적 함의

Concentration은 EI 2위(15.3)로 이론적 잠재력이 높으며, 시나리오 G에서 단독으로 39.7%의 산출평균 감소를 보였다. 복합 시나리오 F2에 포함하면 F1(87.8%) 대비 92.6%로 추가 감소가 가능하였으며, 특히 F1에서 2건 잔존하던 노출기준 초과가 해소되는 것으로 산출되었다. 현장의 ‘거의 전량 원액 사용’이라는 극단적 상태를 완화하는 것만으로도 의미 있는 기여가 가능하므로, 공학적 대책과 병행하는 보조적 방안으로 검토할 가치가 있다.

5) 복합 개선의 승법적 효과

시나리오 F1(87.8%)과 F2(92.6%)의 결과는 ECETOC TRA의 곱셈 구조에서 비롯되는 누적 효과를 정량적으로 보여준다. F1에서 F2로의 추가 감소(87.8% → 92.6%)는 전체 감소율 관점에서 약 4.8%p에 불과하나,

개선 후 노출량 평균(F1 3.35 → F2 2.02 mg/m³)을 기준으로 하면 약 39.7%의 추가 저감에 해당하며, 노출기준 초과 사례의 소멸이라는 규제 준수 관점에서는 의미 있는 차이를 만든다. 이는 현행 PROC을 유지하는 조건에서도 충분한 수의 비PROC 변수를 복합 적용할 경우 노출기준 준수가 달성될 수 있음을 모델 추정 결과로 제시한 것이며, 산업보건 실무에서 ‘위험성 관리의 계층적 접근’에 대한 정량적 참고 근거를 제공한다. 다만 이러한 결과는 ECETOC TRA v3.2의 결정론적 보정계수 체계에 기반한 추정값으로, 각 보정계수가 전제하는 저감 효율(예: LEV 90%)이 현장에서 설계대로 구현된다는 가정하에 성립한다. 따라서 ‘노출기준 초과 0건’은 실측을 통한 확인이 필요한 예측적 결과로 해석되어야 한다.

3. 유럽 ECHA 등록자료와 국내 PROC 분포 비교

ECHA 등록 물질 정보(ECHA, n.d.)에서 확인되는 TCE 산업용 노출시나리오에서는 개방형 증기탈지에 해당하는 PROC 13이 포함되어 있지 않으며, 세척 공정은 밀폐형 시스템(PROC 2/3)으로만 허가되어 있다. 등록된 모든 노출시나리오에서 LEV 및 강화환기가 기본 위험저감조치로 설정되어 있어, 본 연구의 국내 데이터와 대조적인 분포를 보인다(Table 5).

이 비교는 동일한 물질을 동일한 목적으로 사용하면 서도, 공정 형태와 위험관리 조건 모두에서 국내가 유럽보다 현저히 높은 위험도를 보임을 보여준다. 이러한 구조적 차이는 규제 프레임워크의 차이(유럽: 인가 기반 사전 허가제 vs 한국: 노출기준 기반 사후 관리)에서 기

Table 5. Comparison of PROC and risk management conditions between European ECHA registration data and domestic TCE cleaning operations

Comparison item	Europe (ECHA / REACH authorization)	South Korea (this study, n = 357)
PROC for cleaning	PROC 2, 3 (closed system) assumed in registered/authorized exposure scenarios	PROC 13 (57.7%), PROC 19 (27.2%) — no closed-system cases
LEV application	LEV or enhanced ventilation required for all scenarios	75.9% installed, 24.1% not installed
Ventilation conditions	Enhanced ventilation or LEV required as default RMM	65.5% Basic, 4.2% Enhanced
RPE application	Specified per exposure scenario	66.1% not worn
Substance concentration control	RCR < 1 verification mandatory	99.2% using undiluted TCE (> 25%)
OEL (reference)	DNEL-based (varies by registrant)	54.75 mg/m ³ (10 ppm × 5.475 mg·m ⁻³ /ppm)
Regulatory approach	Authorization-based pre-approval	OEL-based post-hoc management

인하는 것으로 판단되며, 향후 국내에서도 발암성 물질에 대해 사용 형태 자체를 규제하는 방향의 정책 검토가 필요함을 시사한다.

4. 연구의 제한점

본 연구는 다음과 같은 제한점을 가진다.

첫째, 노출변수 인코딩 시 작업환경측정 결과표가 ECETOC TRA의 입력변수를 직접 기록하도록 설계된 것이 아니므로, PROC 분류, Fugacity 등급 판정 등에서 연구자의 해석이 개입된다. PROC은 최종 노출추정치에 가장 큰 영향을 미치는 변수이므로(Riedmann et al., 2015), 분류 오류는 전체 분석의 유효성에 직접적 영향을 준다. 둘째, 세척작업은 작업 방식, 작업 시간, 사용량 등의 유동성이 커서 단일 시나리오로의 유형화가 실제 노출 패턴을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 실제로 동일 ES 내 검출치의 분포를 ES별로 검토하였다. 검출치 2,295건 중 ES 내 검출치가 2건 이상이어서 사분위수 범위의 산출이 가능한 1,972건을 판정 대상으로 하여 상용로그 변환 후 $1.5 \times \text{IQR}$ 기준을 적용한 결과, 4.1%가 이상치로 확인되어 ES 내 변동이 존재하였다. 본 연구의 ES 단위 시나리오화는 이를 평균적으로 대표하는 단순화에 해당한다. 셋째, ECETOC TRA는 범용 tier 1 도구로서, 세척조의 크기·형태, 부품 표면적, 용액 교반 정도, 개구부 면적 대비 호흡대 위치 등 세척작업 특유의 요인을 반영하지 못한다. Savic et al.(2023)에서도 ECETOC TRA v3가 PROC 13에 대해 약 70%의 사례에서 실측값보다 낮은 추정치를 산출한 것으로 보고된 바 있다. ETEAM 검증연구 역시 tier 1 도구가 특정 조건에서 실측값을 과소추정할 수 있음을 지적하였으므로(Schlueter & Tischer, 2020), 본 연구의 추정치도 동일한 한계를 공유한다. 아울러 시나리오 A는 모든 PROC을 일괄적으로 PROC 3로 치환하는 단순화된 설계이므로, Professional 설정의 PROC 15와 같이 전환이 오히려 추정 노출을 높이는 조합이 포함되어 있다. 실제 개선 계획 수립 시에는 공정범주별 전환 전후의 E_{ini} 를 개별적으로 대조할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 ECETOC TRA를 '변수 간 상대적 기여도 분석 도구'로 활용하였으므로, 절대적 노출 수치보다는 시나리오 간 상대적 감소율과 변수별 기여도 순위에 초점을 두어 해석해야 한다. 다섯째, EI는 모델 민감도와 현장 개선여지를 결합하는 직관적 지표이나, 복합변수로 통합된 EI가 LEV와 같은 '대상 특정적'

가치를 충분히 반영하지 못할 수 있으므로, 개별 사업장 수준에서는 맞춤형 분석이 필요하다. 또한 IMS는 보정계수의 선형 거리를 기준으로 하므로 척도 간격이 좁은 구간에 분포가 밀집한 변수의 개선여지를 과소평가할 수 있으며, 향후 로그 척도 정규화 등 대안적 정의에 대한 검토가 필요하다. 여섯째, 분석 대상이 2018-2022년 TCE 세척작업에 한정되어 있으므로, 다른 유해화학물질이나 공정 유형에 일반화하기 위해서는 추가 검증이 필요하다.

V. 결 론

본 연구는 ECETOC TRA v3.2의 노출변수 체계를 활용하여 국내 TCE 세척작업의 노출특성을 분석하고, 모델 고유 민감도(S_i)와 현장 개선여지 점수(IMS)를 결합한 노출감소 실효성 지수(EI)에 기반하여 변수별 개선 우선순위를 도출하고, 시뮬레이션을 통해 실효적인 개선방안을 제시하였다.

357개 TCE 세척 노출시나리오 분석 결과, 개방형 담금(PROC 13, 57.7%)과 수작업(PROC 19, 27.2%)이 주요 작업방식이며, 원액 사용(99.2%), 기본 자연환기(65.5%), RPE 미착용(66.1%)이 다수를 차지하는 구조적 고위험 편향 양상을 보였다. S_i 순위는 E_{ini} 복합(41.4%) >> RPE(19.9%) > Duration(15.3%) $\approx$ Concentration(15.3%) > Ventilation(8.0%)이었으며, IMS를 결합한 EI 순위는 E_{ini} 복합(17.7) > Concentration(15.3) > RPE(13.2) > Ventilation(6.6) > Duration(2.1)으로, 공학적 대책이 최우선 과제임이 확인되었다.

8개 개선 시나리오 시뮬레이션에서 PROC 밀폐화(시나리오 A, 산술평균 80.8% 감소, 초과 45→7건)가 단일변수 중 가장 효과적이었으며, 남아있는 초과사례 7건은 전수가 LEV 미설치 조건에서 발생하고 밀폐형 장비에는 LEV가 구조적으로 내장되어 있어 추가 해소가 가능할 것으로 추정된다. LEV 전면 설치(시나리오 B, 산술평균 68.6% 감소)는 단일 공학적 대책으로 최대 효과를 보였으나 12건의 초과가 잔존하였다. 복합 시나리오 F2(B+C+E+G, 산술평균 92.6% 감소)에서는 PROC 전환 없이도 모델 추정상 노출기준 초과 사례가 0건으로 산출되어, 복합적 비PROC 개입을 통해 규제 준수 수준에 도달할 가능성을 정량적으로 제시하였다.

ECHA 등록자료와의 비교에서 국내 TCE 세척작업은 유럽(밀폐형 PROC 필수, 전수 LEV 적용, Enhanced

Ventilation 기본)에 비해 공정 형태와 위험관리 조건 모두에서 현저히 높은 위험도를 보여, 국내 규제 프레임워크가 발암성 물질의 사용 형태 자체를 규제하는 방향으로 전환될 필요성을 시사한다.

본 연구는 ECETOC TRA를 '노출변수 기여도의 정량적 분석 도구'로 재해석하여 활용하였으며, 특히 EI 지표를 도입함으로써 모델 민감도와 현장 실태를 동시에 고려하는 통합적 분석의 필요성을 보여주었다. 다만, 본 연구의 노출수준과 개선효과는 모두 ECETOC TRA v3.2의 결정론적 추정값으로서 실측 농도와 직접 대응되지 않으며, 개선 시나리오의 감소율은 각 위험관리조치가 모델이 전제하는 효율대로 작동한다는 가정에 근거한다. 또한 본 분석은 TCE 세척작업에 한정되어 있으므로, EI 프레임워크의 일반적 유효성을 확인하기 위해서는 실측 자료와의 비교 검증 및 다른 유해화학물질·공정 유형에 대한 추가 검증이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 2024년도 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원에서 수행한 「노출량 추정방식을 활용한 유해인자의 정량적 위험성 평가 기반기술 연구」연구과제를 기반으로 작성되었음.

References

- ACGIH. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design. 30th ed. Cincinnati: ACGIH; 2019. p. 6-16-80
- Anderson RM, May RM. Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control. Oxford: Oxford University Press; 1991. p. 1-12
- Andersson I, Slunge D. Substitution of trichloroethylene in metal parts cleaning in the European Union: A survey-based study on the effects of the authorisation requirements in REACH (FRAM Working Paper). Gothenburg: University of Gothenburg; 2021. Available from: <https://gup.ub.gu.se/file/208586>
- Box GEP. Science and statistics. J Am Stat Assoc 1976;71(356):791-799
- Box GEP, Draper NR. Empirical Model-Building and Response Surfaces. New York: Wiley; 1987. p. 424
- Chaffin DB. Human motion simulation for vehicle and workplace design. Hum Factors Ergon Manuf 2007;17(5):475-484
- Cherrie JW, Fransman W, Heussen GAH, Koppisch D, Jensen KA. Exposure models for REACH and occupational safety and health regulations. Int J Environ Res Public Health 2020;17(2):383
- ECETOC. ECETOC TRA Version 3: Background and Rationale for the Improvements (Technical Report No. 114). Brussels: ECETOC; 2012
- ECETOC. Targeted Risk Assessment: Further Explanation of the Technical Basis of the TRA v3.1 (Technical Report No. 131). Brussels: ECETOC; 2018
- ECETOC. Targeted Risk Assessment user guide for TRA Worker stand-alone tool, version 3.2. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC); 2023. Available from: <https://www.ecetoc.org/tools/tra-main/>
- European Chemicals Agency (ECHA). REACH registration dossier: trichloroethylene (EC 201-167-4, CAS 79-01-6) [Internet]. Helsinki: ECHA; [date unknown] [cited 2026 Jun 24]. Available from: <https://chem.echa.europa.eu/100.001.062>
- European Chlorinated Solvents Association (ECSA). Charter for the safe use of trichloroethylene in metal cleaning [Internet]. Brussels: ECSA; 2007 [cited 2026 Jun 22]. Available from: <https://www.chlorinated-solvents.eu/publications/tri-charter-for-the-safe-use-of-trichloroethylene-2007/>
- European Chlorinated Solvents Association (ECSA). Recommendations for cleaning machines for the use of chlorinated solvents in dry cleaning and surface cleaning [Internet]. Brussels: ECSA; 2021 [cited 2026 Jun 22]. Available from: https://www.chlorinated-solvents.eu/wp-content/uploads/2021/03/2021_03_ECSA-Recommendation-Cleaning-Machine-review_F.pdf
- European Commission. Commission Implementing Decision of 10.8.2018 granting an authorisation for certain uses of trichloroethylene under Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council (Blue Cube Germany Assets GmbH & Co. KG). C(2018) 5057 final [Internet]. Brussels: European Commission; 2018 [cited 2026 Jun 22]. Available from: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/31372>
- Gibaldi M, Perrier D. Pharmacokinetics. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 1982. p. 1-43
- Hoang A, Fagan K, Cannon DL, Rayasam SDG, Harrison R, Shusterman D, et al. Assessment of methylene chloride-related fatalities in the United States,

- 1980–2018. *JAMA Intern Med* 2021;181(6): 797–805
- ICSC (International Chemical Safety Cards). Trichloroethylene. ICSC 0081. Geneva: International Labour Organization; 2013 [cited 2026 Jun 22]. Available from: https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=0081&p_version=2
- Jeong S, Bae G, Lee N. Comparative study on work environment measurement values and ECETOC TRA model values for process-specific exposure levels of dichloromethane manufacturing and using workers in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(4):317–330
- Jo J, Park HH, Jang MY, Kim SJ. Study on the technical basis for quantitative risk assessment of hazardous substances using exposure estimation methods: Evaluation of ECETOC TRA with TCE workplace measurement results (Research Report No. 2024-OSHRI-689). Ulsan: Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI); 2024
- 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
- Kumagai S, Kurumatani N, Arimoto A, Ichihara G. Cholangiocarcinoma among offset colour proof-printing workers exposed to 1,2-dichloropropane and/or dichloromethane. *Occup Environ Med* 2013;70(7):508–510
- Lee HJ, Lee N, Han JH, Lee DH, Shin A, Han SG. Analysis and structuring of determinants for safe management of industrial cleaning (Research Report No. 2023-OSHRI-1131). Ulsan: OSHRI; 2023
- Lee N, Lee I, Jeong S. Review of chemical inhalation exposure model and application of ECETOC TRA model to dichloromethane handling job (Research Report No. 2020-OSHRI-849). Ulsan: OSHRI; 2020
- Lee N, Lee HJ, Jeong S, Lee DH, Shin A. Review of problems with use of halogenated cleaning solvents revealed through case studies of cleaning solvent poisoning and analysis of domestic and overseas regulations. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2023;33(4):517–527
- Lee N, Jeong S, Shin A, Kwon SH. Investigation of social infrastructure for the transition to advanced control technology for halogenated solvent cleaning (Research Report No. 2024-OSHRI-770). Ulsan: OSHRI; 2024
- Massachusetts Office of Technical Assistance and Technology (OTA). OTA case study: Inner-Tite Corporation [Internet]. Boston (MA): Executive Office of Energy and Environmental Affairs; 2012 [cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://www.mass.gov/info-details/ota-case-study-inner-tite-corporation>
- Ministry of Employment and Labor (MoEL). Occupational Safety and Health Act, Article 125. Sejong: MoEL; 2026
- NEWMOA (Northeast Waste Management Officials' Association). Pollution prevention technology profile: closed loop vapor degreasing. Boston (MA): NEWMOA; 2001
- Riedmann RA, Gasic B, Vernez D. Sensitivity analysis, dominant factors, and robustness of the ECETOC TRA v3, Stoffenmanager 4.5, and ART 1.5 occupational exposure models. *Risk Anal* 2015; 35(2):211–225
- Savic N, Urbanus J, Henschel O, Li Q, Marsh D, Money C, et al. ECETOC TRAv3: an in-depth comparison of publicly available measurement data sets with modelled estimates of occupational inhalation exposure to chemicals. *Ann Work Expo Health* 2023;67(4):496–507
- 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
- Slunge D, Andersson I, Sterner T. REACH authorisation and the substitution of hazardous chemicals: The case of trichloroethylene. *J Clean Prod* 2022;364:132637
- 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
- Tum Suden KD, Flynn MR, Goodman R. Computer simulation in the design of local exhaust hoods for shielded metal arc welding. *Am Ind Hyg Assoc J* 1990;51(3):115–126
- U.S. EPA. Methylene chloride; Regulation under the Toxic Substances Control Act (TSCA). Final rule. *Fed Regist* 2024a;89(91):39254–39358. Available from: <https://www.federalregister.gov/documents/2024/05/08/2024-09606/methylene-chloride-regulation-under-the-toxic-substances-control-act-tsca>
- U.S. EPA. Trichloroethylene (TCE); Regulation under the Toxic Substances Control Act (TSCA). Final rule. *Fed*

Regist 2024b:89(242):102568-102635. Available from:
<https://www.federalregister.gov/documents/2024/12/17/2024-29274/trichloroethylene-tce-regulation-under-the-toxic-substances-control-act-tsca>

<저자정보>

조지훈(연구위원), 이해진(연구위원), 정기효(교수)