

연구보고서

노출량 추정방식을 활용한 유해인자의 정량적 위험성 평가 기반기술 연구

- TCE 작업환경측정결과를 통한 ECETOC TRA 평가 -

조지훈·박현희·장미연·김수진

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2024년 02월 ~ 2024년 11월
- 핵심단어 작업환경측정, 위험성평가, 노출추정, ECETOC TRA
- 연구과제명 노출량 추정방식을 활용한 유해인자의 정량적 위험성 평가 기반기술 연구 - TCE 작업환경측정결과를 통한 ECETOC TRA 평가 -

1. 연구배경

현재 국내 노출평가 주 형태는 작업환경측정이나 이는 측정 또는 분석 기술의 제한으로 평가대상에 제한이 발생한다. 이에 따라, 위험성 평가 위주의 산업보건제도 정비에 따라 원칙적으로 모든 유해인자의 평가 원칙을 지원하기 위해 물리화학적특성·공정·작업조건·관리방식 등 노출변수를 이용, 노출량 추정을 통한 노출평가가 요구된다. 그러나 기존의 노출평가 도구는 제한적인 지역의 데이터를 기초로 개발되고 평가되어 국가 및 지역의 노출환경에 맞는 조정이 필요하다. 이를 위해 누적된 작업환경측정 결과 DB를 토대로 이미 개발된 노출평가 도구를 검증함으로써 우리나라 작업환경에 적용할 수 있는 타당성을 마련하는 한편, 해당 데이터를 활용하여 노출에 영향을 주는 인자를 도출하고, 이들 변수를 조합하여 노출 변수와 노출량과의 관계를 확인함으로써 사업장 화학물질의 정량적 위험성 평가에 확장적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2. 주요 연구내용

1) ECETOC TRA 로직 분석 및 이해

ECETOC TRA Excel 분석 결과, ECETOC TRA의 흡입 노출 추정값은 PROC(공정범주), 물리적 상태, 국소배기장치 설치·가동 여부, 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity), 작업환경 유형(type of setting : 산업용/전문가용) 등 5개의 변수에 따라 초기 노출 추정값을 산출하고, 이에 환기방식, 노출시간, 함유량, 호흡용 보호구 등의 변수로 조정하여 8시간 노출 추정값과 단시간 노출 추정값을 최종 산출한다.

2) 작업환경측정결과 추출자료의 일반적 특성

작업환경측정결과표 등으로부터 정리된 데이터를 노출 시나리오별로 가공한 뒤 근로자수, PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 국소배기장치 설치·가동 여부, 호흡용 보호구 등의 변수에 따라 개괄적으로 분석한 결과, 근로자수 기준 사업장 크기는 50인 이하의 사업장의 수가 약 79% 비율을 차지하여 압도적으로 많았다. PROC(공정범주)의 경우 세척제 용도로 주로 쓰이는 트리클로로에틸렌의 특성상 담금작업(PROC13)의 비율이 약 58%로 현저히 많았으며, 증기의 휘발정도(fugacity)를 보면, 많은 경우가 실온에서 취급하여 약 76% 비율이 중간 정도(medium)의 휘발성을 보였으며, 초음파 세척조에서의 증기탈지 등 가열을 하는 경우로 인해 24% 가량은 높은 정도(high)의 휘발성을 나타내었다. 환기방식의 경우는 실내에서의 기본적인 환기(indoors - no or basic ventilation)가 약 66%, 실내에서의 좋은 환기(indoors - good ventilation)가 약 29%의 비율로 두 환기방식이 대다수를 차지하였다. 노출시간에서는 '15분에서 1시간'과 '15분 미만'의 입력값이 각각

63%, 28%로 많았으나, 대부분의 세척작업이 세척 물량에 따라 변이가 크고 간헐적인 작업특성이 있어 해석에 주의가 요구된다. 국소배기장치는 설치·가동(yes)의 경우가 약 76%로, 그렇지 않은 경우(no)의 비율 약 24% 보다 높게 나타났다.

3) 평가 지표별 ECETOC TRA 노출모델 평가

로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값의 관계를 분석한 결과, 전체 데이터를 이용한 경우와 75% 분위수값을 이용한 경우 모두 조정 결정계수(R^2)가 0.12로 일치정도는 크지 않았다.

노출모델의 과대/과소 추정 경향성 (conservatism, 보수성) 평가 결과, 데이터와 무관하게 실제 노출값이 작은 경우 과대로, 실제 노출값이 큰 경우 과소로 추정하는 경향성을 확인하였다. 또한, 전체 데이터의 경우 58.3%의 데이터가 과대평가이었으며, 그 중 대부분이 노출 추정값이 실제 노출값의 1~5배 수준이었다. 75% 분위수 데이터를 이용한 경우도 유사했는데, 48.8%의 데이터가 과대평가이었으며, 역시 대부분은 노출 추정값이 실제 노출값의 1~5배 수준이었다.

노출변수별 노출 추정 경향성 기여도 분석을 위해, 노출변수별 시각화 및 회귀분석 실시 결과, PROC(공정범주)에 대하여는 PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19 등에서, ‘국소배기 설치·가동 여부(yes/no)’ 관련해서는 ‘국소배기 설치·가동(yes)’의 입력값이, 노출시간 입력값에서 ‘15분에서 1시간’ 값이 과소평가 되기 쉬운 것으로 확인되었다.

4) 다중 회귀분석을 통한 별도의 노출량 추정모델 생성

ECETOC TRA와는 별개로 작업환경측정결과를 이용하여 (전체 데이터 또는 75% 분위수 데이터) x (ECETOC TRA의 노출변수 또는 ECETOC TRA의

노출변수와 추가변수)의 4가지 조건에 따라 각각 다중 선형 회귀분석한 결과 조정 결정계수(R^2)는 0.32~0.36으로 주어진 변수로 노출수준의 변동을 설명하기에는 다소 부족하였다. 노출 추정값의 과대평가 비율은 전체 데이터를 이용하는 경우 46~48% 수준이었고, 75% 분위수 데이터를 이용하는 경우 65~67% 수준으로 증가하였다. 전체 데이터 및 75% 분위수 데이터를 이용하는 경우 각각 87~89%, 약 79%의 비율로 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배 사이에 분포하였다. 추가로 95%와 99% 분위수 데이터를 이용하여 같은 분석을 한 결과, 95%와 99% 분위수 데이터에 대하여 노출 추정값의 과대평가 비율은 각각 92~94%와 98~99%였고, 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배 사이에 분포한 비율은 각각 57~59%, 34~36%였다.

3. 연구 활용방안

유럽의 Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of CHemicals 제도 도입 이래 모든 화학물질의 유해성 및 위험성의 평가는 단순히 지향점이 아니라 실현되어야 할 명제이다. 이를 위해 현재의 작업환경측정 위주의 노출평가 방식에서 벗어나 위험을 평가하는데 노출모델 적용이 적극적으로 고려되어야 할 것이며, 본 연구는 이를 위한 기초를 마련함으로써 노출평가의 효율성과 확장성 증대에 기여할 것으로 기대된다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 연구위원 조지훈
 - ☎ 052) 703. 0884
 - E-mail lmalone@kosha.or.kr

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	3
2. 연구의 목적	5
II. 연구방법	7
1. 연구대상 선정	9
1) 연구대상 노출평가 도구	9
2) 연구대상 유해인자	11
3) 연구대상 자료	12
2. 연구대상 자료 분석 및 노출변수 추출	12
1) 작업환경측정 결과표 분석 및 자료 추출	12
2) 추출자료 인코딩	12
3. 노출평가 모델 실행 및 노출 추정값 평가	13
1) 노출평가 모델 변수값 입력 및 노출 추정치 산출	13
2) 평가 지표별 노출평가 모델 평가	13
3) 노출변수와 실제 노출수준에 대한 회귀분석	16
4) 통계분석 및 시각화	17

목 차

Ⅲ. 연구결과	19
1. 연구대상 선정	21
1) 연구대상 노출평가 도구	21
2) 연구대상 유해인자	39
3) 연구대상 자료	41
2. 연구대상 자료 분석 및 노출변수 추출	44
1) 작업환경측정 결과표 분석 및 자료 추출	44
2) 추출자료 인코딩	47
3) 추출자료의 일반적 특성	47
3. 노출평가 모델 실행 및 노출 추정값 평가	52
1) 노출평가 모델 변수값 입력 및 노출 추정치 산출	52
2) 자료의 적용	52
3) 평가 지표별 노출평가 모델 평가	53
Ⅳ. 고찰 및 결론	75
1. 고찰	77
2. 결론	81

참고문헌	83
Abstract	87
부록	93
1. 작업환경측정결과표 상의 수집정보	93
2. PROC(공정범주) 설명 및 예시	97
3. 주요 노출변수별 측정데이터 분포	102
4. 각 변수별 개괄적 상관관계	109
5. 주요 노출변수에 따른 데이터 구성	110
6. 다중 선형회귀분석의 각 회귀식 성능	111

표 목차

〈표 II-1〉 3가지 노출모델의 입력변수 비교	10
〈표 III-1〉 ECETOC TRA(버전 3.2)에서 작업자 흡입 노출을 평가하는데 필요한 입력변수	22
〈표 III-2〉 ECETOC TRA 초기값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약 ...	25
〈표 III-3〉 ECETOC TRA 흡입 노출 추정이 제한되는 변수 조합	29
〈표 III-4〉 ECETOC TRA 8시간 노출 추정값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약	30
〈표 III-5〉 ECETOC TRA 단시간 노출 추정값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약	35
〈표 III-6〉 유기화합물 특별관리물질 중 5년간(18~22년) 측정시료수 및 불검출률	40
〈표 III-7〉 트리클로로에틸렌에 대한 ECETOC TRA 입력정보	41
〈표 III-8〉 작업환경측정결과에서의 수집 정보	42
〈표 III-9〉 2018~2022년 5년간 트리클로로에틸렌 8시간 TWA 측정현황 ...	43
〈표 III-10〉 2018~2022년 5년간 트리클로로에틸렌 단시간 노출수준 측정현황	43
〈표 III-11〉 작업환경측정결과표 상의 수집정보 정리 예시	45
〈표 III-12〉 작업환경측정결과표 분석 및 1차 정리결과 예시	46
〈표 III-13〉 변수에 따른 추출자료의 일반적 특성	48
〈표 III-14〉 실제 노출값과 노출 추정값을 적합한 회귀식의 계수 및 결정계수 ...	55

〈표 III-15〉 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수 및 MAE	57
〈표 III-16〉 DeltaTRA에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(전체 데이터) ..	61
〈표 III-17〉 DeltaTRA에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약 (75% 분위수 데이터)	62
〈표 III-18〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약 (전체 데이터, ECETOC TRA 변수)	63
〈표 III-19〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석 요약 (전체 데이터, ECETOC TRA 및 추가 변수)	65
〈표 III-20〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약 (75% 분위수 데이터, ECETOC TRA 변수)	68
〈표 III-21〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약 (75% 분위수 데이터, ECETOC TRA 및 추가 변수)	70
〈표 III-22〉 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수	74

그림목차

[그림 Ⅲ-1] ECETOC TRA 초기설정값과 각 변수와의 관계(액체)	26
[그림 Ⅲ-2] ECETOC TRA 초기설정값과 각 변수와의 관계(고체)	27
[그림 Ⅲ-3] ECETOC TRA 8시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(액체) ...	32
[그림 Ⅲ-4] ECETOC TRA 8시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(고체) ...	33
[그림 Ⅲ-5] ECETOC TRA 단시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(액체) ...	37
[그림 Ⅲ-6] ECETOC TRA 단시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(고체) ...	38
[그림 Ⅲ-7] 트리클로로에틸렌의 구조	39
[그림 Ⅲ-8] ECHA 조화분류에 따른 트리클로로에틸렌 유해성 그림문자	39
[그림 Ⅲ-9] 추출자료의 노출변수별 특성	50
[그림 Ⅲ-10] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%)	54
[그림 Ⅲ-11] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터)	54
[그림 Ⅲ-12] 각각 로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값의 차이 (x축은 실제 노출값)	55
[그림 Ⅲ-13] 각각 로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값의 차이 (x축은 실제 노출값, 75% 분위수 데이터)	56
[그림 Ⅲ-14] 노출변수별 DeltaTRA	59
[그림 Ⅲ-15] 노출변수별 DeltaTRA(75% 분위수 데이터)	60
[그림 Ⅲ-16] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%)	64

[그림 Ⅲ-17] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 변수 추가)	67
[그림 Ⅲ-18] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터)	69
[그림 Ⅲ-19] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식 (보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터, 변수 추가) ..	72
[그림 Ⅲ-20] 각 분위수 데이터별 과대평가 경향	73

I. 서론



I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

화학물질은 산업현장과 일상에서 빈번하게 쓰이고 있으며, 이러한 화학물질은 그 유용성과 함께 동시에 위해성을 가지고 있다. 화학물질의 유용한 측면을 충분히 누리기 위해서는 그 위해성이 적절히 통제되어야 함은 물론이다.

화학물질의 위해성은 유해성과 노출의 각 측면으로 통제 가능하며, 실제로 유럽의 Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of CHemicals(이하 REACH) 법령에서는 인간의 건강과 환경에 대한 높은 수준의 보호를 목표로 화학물질의 안전한 사용을 위해 화학물질 및 화학제품의 제조자, 수입자 등 공급자에게 특정한 의무를 부과하고 있고, 이러한 의무의 일부로서 제조자 등은 화학물질 안전성 보고서(chemical safety report)에 화학물질의 유해성과 노출평가 등과 관련한 자료를 담아 제출하도록 하고 있다. 또한 국내의 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률(이하 화평법)에서도 이와 유사하게 화학물질 전 과정에서의 취급방법과 노출통제·관리방법을 기술한 노출시나리오를 포함한 위해성에 관한 자료(이하 위해성 자료)를 제출하도록 함으로써 과학적 자료에 근거하여 화학물질로 인해 발생하는 위해성을 통제하는 한편 이를 통해 화학물질의 안전한 사용이라는 목표를 달성하려 하고 있다.

위해성의 한 축인 유해성은 화학물질의 고유한 성질인데 반해, 다른 한 축인 노출은 화학물질이 취급되는 환경에 따라 변화할 수 있어 노출 통제를 통한 화학물질의 안전한 사용과 관리를 위하여 화학물질의 노출수준이 개별적으로 확인되고 평가되어야 한다. 화학물질의 노출수준의 평가는 크게 작업환경측정과 측정시료의 분석을 통하거나, 노출평가 모델을 활용한 노출량 추정을 통해 이루어질 수 있다.

국내에서는 측정매체나 직독식 기기를 활용한 작업환경의 직접측정이 노출 평가의 주요 방식이라 할 수 있는데, 1981년부터 유해인자로부터 근로자의 건강을 보호하고 쾌적한 작업환경을 조성하기 위해 인체에 해로운 작업을 하는 작업장을 보유한 사업주로 하여금 작업환경측정을 하도록 강제하고 있는 산업안전보건법에 따른 것이다.

이러한 작업환경의 직접 측정을 통한 노출평가 방식은 다수 시간의 소요, 공간의 제약, 경제적 부담 등 고유의 제한점이 존재한다. 이에 더해, 직접적인 작업환경측정이 기술적으로 불가능하거나 측정방법이 마련되어 있지 않은 경우 등 측정이 가능하지 않은 경우도 있어 화학물질의 포괄적 평가라는 지향을 달성하기에는 다소 부족한 면이 있다. 이에 반해 노출평가 모델을 활용하는 노출평가의 경우 비교적 짧은 시간에 적은 비용으로 효율적으로 수행할 수 있는 장점을 가지고 있고, 노출에 관계되는 변수의 확인과 대입으로 노출량을 추정하므로 측정의 기술적 가능성과 무관하게 높은 확장성이 특징이다. 실제로 유럽의 REACH, 국내의 화평법 등의 규제에서는 노출 평가를 하는데 있어 노출평가 모델의 활용을 권고하는 한편, 이에 더해 일부 노출평가 도구를 제공하고 있기도 하다.

노출평가를 포함하는 위험성 평가 도구는 정성적인 방식과 정량적인 방식으로 나눌 수 있고, 정성적인 방식의 위험성 평가 도구에는 영국의 컨트롤 밴딩이나 안전보건공단에서 제공하는 charm(chemical hazard risk management) 등의 도구를 예로 들 수 있다. 반면 정량적인 위험성 평가 도구로는 ECETOC TRA, EUSES, ConsEXPO, Stoffenmanger, ART 등이 있다.

정성적 위험성 평가 도구는 위에 열거한 노출평가 모델을 활용할 때의 장점을 모두 갖고 있고, 상대적으로 적은 변수와 용이한 사용의 장점이 있는데 반해, 변수값의 선택에 있어 임의성이 있어 평가자간 평가결과에 변이가 다소 심한 단점이 있다.

위에 열거한 사실들에 따라 화학물질의 안전한 사용을 목표로 포괄적인

노출평가를 지원하기 위하여 정량적 노출평가 도구의 활용이 필요한 것으로 판단된다. 다수의 정량적 노출평가 도구가 개발되고 개정되어 왔으나, 해당 노출평가 도구들이 제한적인 지역의 데이터를 기초로 개발되고 평가되어 국가 및 지역의 노출환경에 관계없이 보편적으로 적용될 것으로 기대하는 것은 타당하지 않다. 실제로 다수의 연구(Kupczewska-Dobecka et al., 2011; Mc Donnell et al., 2011; Ishii et al., 2017; Savic et al., 2017, 2019, 2023; van Tongeren et al., 2017; Lee et al., 2019)에서 노출평가 모델의 정확도, 신뢰성 등을 검증 또는 평가한 바 있으며, 연구의 결과로 국가 또는 작업환경 등 노출환경에 따라 다른 경향성을 보여주고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국내의 누적된 작업환경측정결과를 토대로 이미 개발되어 적용 중인 정량적 노출평가 모델을 평가함으로써 해당 모델의 국내 작업환경에의 적용 기반을 마련하고자 한다.

2. 연구의 목적

기 개발된 정량적 노출평가 도구를 누적된 국내의 작업환경측정결과를 활용하여 검증 및 평가함으로써 정량적 노출평가 도구의 활용에 대한 기반을 마련하고자 한다. 추가로 위험성 평가에의 활용을 통해 누적된 작업환경측정 결과 자료 활용에의 확보를 부가적인 목적으로 한다.

II. 연구방법



II. 연구방법

1. 연구대상 선정

1) 연구대상 노출평가 도구

이번 연구에서는 노출평가 도구(모델)의 평가가 이루어지는 주요 자료가 국내 작업환경측정결과 및 작업환경측정결과표이므로 해당 자료의 특성을 고려하여 이미 개발된 정량적 노출평가 모델 중 연구대상 노출평가 모델을 선정하였다.



노출평가 도구는 노출량의 추정을 위해 요구되는 정보의 수준에 따라 각 tier로 구분된다. 높은 tier의 모델일수록 노출량의 추정에 있어 보다 많은 정보를 요구하는데, 작업환경측정결과와 측정결과표를 검토해 본 결과 노출평가 도구에서 그에 대응하는 정보를 추출하기 어렵기 때문에 높은 tier의 노출평가 도구는 연구대상에서 제외되었다. 실제로 통상 tier 1.5에 해당하는 Stoffenmanager는 방출원과의 거리, 작업장의 체적, 격리 여부 등의 정보를 요구한다. 또한 대표적인 tier 2 모델인 Advanced REACH Tool(이하 ART)는 이에 더해 방출원의 특성, 오염정도 등의 정보를 추가로 요구하며 이러한 정보는 현재의 작업환경측정 결과나 측정결과표를 통해 입수하기 매우 어렵다. 이 외 ConsExpo(tier1, tier2) 노출평가 도구는 소비자 노출평가에 특화된 것으로 알려져 있고, EUSES 모델(tier2)은 환경에 보다 적합하며 소비자 노출의 평가 등에 대해 다른 모델 보다 비교적 최악의 시나리오를 다루어 선호되지 않는 것으로 알려져 있어 평가 대상 도구로 이번 연구에서 고려되지 않았다. <표 II-1>에서는 Lee 등의 2019년 연구결과에서 일부 편집하여 ECETOC TRA, Stoffenmanager¹⁾,

¹⁾ Stoffenmanager. 무료로 사용할 수 있는 웹 도구로 무료 버전 외에도 상용 프리미엄 버전이 있음. Stoffenmanager는 증기, 저휘발성 액체의 에어로졸 및 흡입성 분진에 대한 흡입 노출을 추정하기 위한 정량적 모델이며, Stoffenmanager 관련 매개변수를 포함한 약 1000개의 측정값이 포함되어 있음.

ART²⁾ 등 3종의 노출모델을 입력변수 중심으로 비교하였다.

〈표 II-1〉 3가지 노출모델의 입력변수 비교

입력변수		ECETOC TRA (버전 3.2)	Stoffenmanager (버전 7.0)	ART (버전 1.5)
유해 인자	물리적 상태	해당	해당	해당
	취급 온도	해당	해당	해당
	증기압	해당	해당	해당
활동	활동 범주	해당	해당	해당
	발생원	해당없음	해당없음	해당
	노출시간	해당	해당	해당
	빈도	해당없음	해당	해당없음
	발생원과 거리	해당없음	해당	해당
	동료 근로자	해당없음	해당	해당
	증발, 건조, 양 생	해당없음	해당	해당없음
	오염정도(%)	해당없음	해당없음	해당
확산	작업장 유형	해당없음	해당없음	해당
	작업장 체적	해당없음	해당	해당
	노출저감방법	해당	해당	해당
	보조 저감방법	해당없음	해당없음	해당
	전체환기	해당	해당	해당
	격리	해당없음	해당	해당
	호흡보호구	해당	해당	해당
	피부노출	해당	해당없음	해당없음
청소	2차 발생원	해당없음	해당없음	해당
	밀폐 및 감시	해당없음	해당없음	해당
	기계정비	해당없음	해당	해당
	일반청소	해당없음	해당	해당

*  노출모델에서 해당 입력값을 요구하는 경우
 노출모델에서 해당 입력값을 요구하지 않는 경우

2) ART. 고급 REACH 도구인 ART는 기계론적으로 모델링된 노출 추정치와 관련된 노출 측정값을 활용하며 노출 변동성과 불확실성의 전체 분포에 대한 추정치를 제공하여 사용자가 특정 위험 평가의 요구 사항에 따라 다양한 합리적으로 예측 가능한 현실적이고 최악의 노출 추정치를 산출할 수 있게 해주는 무료 웹도구임. ART는 호흡 보호구(RPE)의 효과를 고려하지 않음. 해당 도구는 전문 평가자에게 적합하며, 기계론적 모델과 노출 데이터베이스의 정보를 포함한 경험적 부분을 통합함.

상기 이유들과 유럽의 REACH, 환경부의 화평법에서도 사용이 우선 권고되어 광범위하게 사용되고 있다는 점을 고려하여 이번 연구의 평가대상 노출평가 도구로 ECETOC TRA 모델을 선정하였다.

노출평가 모델의 선정 이후, 모델의 로직을 직접 분석하거나 조합 가능한 모든 변수에 대해 생성된 노출 추정값으로 회귀분석 등을 실시하여 선정 노출평가 모델의 평가 전에 노출평가 모델의 독립변수 별 노출 추정값의 관계를 확인 등 모델에 대한 이해도를 제고하였다.

2) 연구대상 유해인자

선정된 노출평가 모델이 요구하는 다양한 변수에 대한 평가가 가능하도록 불검출 또는 검출한계미만의 측정결과값이 아닌 자료가 다수인 유해인자 및 노출평가 모델에 적합한 유해인자의 형태(유기화합물, 금속류, 분진 등)를 고려하여 대상 유해인자를 선정하였다.

선정된 노출평가 모델인 ECETOC TRA의 평가대상으로 적합한 유기화합물 중, 유해성이 높은 물질로서 산업안전보건법 상 특별관리물질이 우선적으로 고려되었다. 또한, 노출평가 모델을 평가하는데 있어 추후 외삽의 가능성을 줄이고자 세척작업에 주로 쓰여 고농도의 노출이 예상되는 주요 세척제 용도 화학물질 가운데, 작업환경측정결과 불검출 또는 검출한계 미만이 상대적으로 적은 트리클로로에틸렌을 연구대상 유해인자로 선정하였다.

2018년부터 2022년 작업환경측정결과 분석결과, 트리클로로에틸렌은 총 25,234건 측정되었으며 다른 대다수의 특별관리물질 유기화합물 중 가스상 물질인 포름알데히드를 제외하고 가장 낮은 불검출률(61.44%)을 보였다.

3) 연구대상 자료

트리클로로에틸렌의 노출량 추정을 위하여 선정된 노출평가 모델인 ECETOC TRA에서 요구되는 입력변수를 추출하고자 2018년부터 2022년까지 5년간 트리클로로에틸렌을 취급하여 작업환경측정을 실시한 사업장의 작업환경측정 결과표를 분석대상으로 하였다.

2. 연구대상 자료 분석 및 노출변수 추출

1) 작업환경측정 결과표 분석 및 자료 추출

선정된 연구대상 유해인자인 트리클로로에틸렌에 대한 사업장 작업환경측정 결과표를 분석하여 선정된 노출평가 모델인 ECETOC TRA에서 요구되는 입력변수와 관련 있는 정보를 추출 및 수집하여 Excel로 정리하였다. 그러한 정보로는 예비조사 항목의 작업공정별 유해요인 분포 실태, 작업공정별 유해요인 발생 실태, 작업환경설비 실태 및 문제점, MSDS 별첨 자료 등이 해당한다. 추가로 작업환경측정결과표의 정보는 ECETOC TRA에서 요구되는 입력변수와 관련한 정보를 추출하는데 있어 매우 제한적이므로 자료가 있는 경우 안전보건공단의 작업환경측정 신뢰성 평가결과를 우선하여 보완하였다.

2) 추출자료 인코딩

작업환경측정결과표와 안전보건공단의 작업환경측정 신뢰성 평가결과 분석과 그 결과로 추출된 자료를 선정된 노출평가 모델에서 요구하는 변수의 값과 형식에 맞게 인코딩하였으며, 해당 과정에서 자료 부족 등의 사유로, 필요한 경우 측정결과표 상의 간접적으로 추정이 가능한 다른 자료와 별도의 문헌을 참고하여 인코딩하였다.

작업환경측정결과 등으로부터 ECETOC TRA에서 요구되는 입력변수와 직접 관련한 정보가 제한되는 경우 사용량, 작업설비 등으로부터 추정하거나 이마저도 제한되는 경우 최악의 작업환경으로 가정하였다. 예를 들어, 별도의 구체적 작업형태와 관련한 정보를 확인하기 어렵고 월간 사용량이 20ml 이하 등으로 소량인 경우 임의로 수작업(PROC19)의 공정범주(PROC)을 배정하였다. 또한, 별도의 구체적 작업형태와 관련한 기재 내용은 없지만 작업설비에 대한 내용으로 초음파 세척, 세척조 등을 언급한 경우 담금작업(PROC13)으로 배정하였다.

3. 노출평가 모델 실행 및 노출 추정값 평가

1) 노출평가 모델 변수값 입력 및 노출 추정치 산출

앞서 작업환경측정결과표 분석과 추출, 인코딩된 자료 중 작업방식, 노출시간, 화학물질의 제품 내 농도 등이 확인되지 않거나 추정할 수 없는 데이터를 제외한 뒤, 인코딩된 입력값들을 Excel 형태로 제공되는 ECETOC TRA의 각 셀에 입력하여 노출 추정치를 산출하였다.

2) 평가 지표별 노출평가 모델 평가

변수별 입력값을 입력하여 산출한 노출 추정치와 실제 노출수준을 비교함으로써 선정된 노출평가 모델의 타당성을 다수의 지표로 평가하였다. 평가에 활용된 지표는 다음과 같으며, 각각의 지표들은 노출평가 모델의 서로 다른 성능을 평가하는데 활용하였다: (1) 노출 추정치와 실제 노출수준과의 상관관계 분석(회귀분석 및 회귀식의 성능평가)을 통한 노출평가 모델의 설명력 확인; (2) 노출 추정치와 실제 노출수준과의 차이 분석과 평균절대오차(Mean Absolute Error, 이하 MAE) 산출, 구간별 노출 추정치와 실제 노출수준 배수 조사를

통한 노출평가 모델의 보수적 경향성(conservatism) 평가; (3) 노출변수 별 노출 추정치와 실제 노출수준과의 차이 분석을 통해 노출평가 모델의 과소 또는 과대 경향에 각 변수가 기여하는 정도의 확인; (4) 노출변수와 실제 노출수준에 대해 회귀분석을 실시하여 실제 노출값과 각 변수와의 관계 등을 확인하였다. 세척작업의 간헐적 사용 특성, 미사용 등 사유에 따라 수집된 데이터 중 노출 데이터가 0이 아닌 값(이후 전체 데이터로 지칭)을 사용하여 분석하였으며, 추가로 ECETOC TRA가 노출 데이터의 75% 분위수에 해당하는 값을 적용하여 개발된 것임을 감안하여 각 노출시나리오 별로 노출 데이터의 75% 분위수값(이후 75% 분위수 데이터로 지칭)을 사용하여 분석하였다.

(1) 노출 추정치와 실제 노출수준과의 상관관계 분석

직업적 노출이 일반적으로 대수정규분포를 따른다고 알려져 있으므로 각각 로그변환된 ECETOC TRA 노출 추정값과 실제 노출값을 선형으로 회귀분석하여 절편, 계수, 결정계수(R^2) 등을 산출하였다. 추가로 노출 추정값과 실제 노출값을 각 축으로 하여 회귀식과 함께 산포도를 그려 시각화하였다.

(2) 노출모델의 과대/과소 추정 경향성 (conservatism, 보수성) 평가

로그변환된 노출 추정값(logModelled)과 로그변환된 실제 노출값(logMeasured)의 차이를 아래식과 같이 Δ_{TRA} 로 정하고, 1) 로그변환된 실제 노출값에 대한 시각화, 2) 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수 조사, 3) MAE(Walther and Moore, 2005; Savic et al., 2023), bias(Lee et al., 2019) 및 precision(Lee et al., 2019) 계산, 4) 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수 확인 등을 실시하였다.

$$\Delta_{TRA} = \log\text{Modelled} - \log\text{Measured}$$

가) Delta_{TRA}

로그변환된 노출 추정값과 로그변환된 실제 노출값의 차이인 Delta_{TRA}의 부호에 따라 노출모델의 과대/과소 평가가 구분된다. 음수 값의 Delta_{TRA}는 과소평가를, 양수 값의 Delta_{TRA}는 과대평가를 의미한다.

나) MAE, bias, precision

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\log Modelled - \log Measured|$$

MAE는 Delta_{TRA}에 대한 시각화와 함께 노출 추정값과 실제 노출값의 차이를 확인하며, Delta_{TRA} 시각화가 모든 점에 대한 대략의 추세를 확인하는 반면, MAE는 단일값으로 노출 추정값이 실제 노출값으로부터 평균적으로 얼마나 떨어져 있는지 보여준다.

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log Modelled - \log Measured)$$

$$precision = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\log Modelled - \log Measured) - bias]^2}{n-1}}$$

Bias는 역시 MAE와 동일하게 노출 추정값과 실제 노출값이 떨어진 정도를 정량적으로 확인하는 지표이나, MAE와 달리 절대값을 취하지 않아 Delta_{TRA}의 평균이 되며, precision은 노출 추정값과 실제 노출값 차이의 편차가 된다.

다) 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수

노출 추정값(Modelled)을 실제 노출값(Measured)으로 나누어 1/100배 미만, 1/100~1/10배, 1/10~1/5배, 1/5~1배, 1~5배, 5~10배, 10~100배, 100배 이상 구간에 따라 빈도와 비율(%)을 조사하였다.

라) 노출변수별 노출 추정 경향성 기여도 분석

PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량, 국소배기장치 설치·가동 여부 등 노출변수에 따라 Δ_{TRA} 를 시각화 하여 각 변수에 따른 과대/과소 추정 경향성을 분석하였다.

각 변수에 대해 노출 추정값의 과대/과소 추정 경향성을 정량적으로 살펴 보기 위해 Δ_{TRA} 를 종속변수로 하고 노출변수를 독립변수로 하여 아래 식에 적용하여 다중 회귀분석을 실시하였다. 각 계수와 절편은 각 변수의 특정 입력 값인 기본값에 대비한 값이다.

$$\Delta_{TRA} = a_0 + a_1proc + a_2fugacity + a_3vent + a_4dur + a_5conc + a_6lev$$

위 식에서 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식(vent), 노출시간(dur), 함유량(conc), 국소배기 설치·가동 여부(lev) 등 변수에 따라 Δ_{TRA} 에의 기여정도를 정량적으로 분석하였다.

3) 노출변수와 실제 노출수준에 대한 회귀분석

ECETOC TRA 노출모델의 평가 외에 추출된 노출변수값과 실제 노출값을 이용하여 아래의 식에 따라 선형 다중 회귀분석을 적용함으로써 별개의 노출 모델을 생성하였다. 별도 노출모델의 생성에는 전체 데이터와 75% 분위수 데이터를 이용하였으며, ECETOC TRA 노출모델의 노출변수 중 이용 가능한 변수인 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량 등 5개 변수를 독립변수로 적용하였다.

$$\log_8\text{시간노출추정값} = a_0 + a_1proc + a_2fugacity + a_3vent + a_4dur + a_5conc + a_6lev$$

이들 변수 외에 변동에 대한 설명력을 높이기 위해 작업환경측정결과에서 확인 가능한 변수 중 작업환경 및 노출수준에 간접적으로 영향을 미칠 수 있는

것으로 생각되는 지역(지방관서 기준, area_moel), 사업장 규모(worker_count_g) 등 2개 변수를 더하여 아래의 식에 따라 추가로 분석하였다. 사업장 규모는 연속형 변수인 사업장의 근로자수를 ‘50인 미만’, ‘50인 이상 300인 미만’, ‘300인 이상’의 범주형 변수로 변환하여 적용하였다. 최초 업종(세세업종 기준) 또한 추가되는 독립변수로의 적용을 고려하였으나, 지역(지방관서 기준), 근로자수 변수와의 상관관계가 매우 높은 다중공선성이 발생하여 제외하였다.

$$\begin{aligned} \log 8 \text{시간노출추정값} = & a_0 + a_1 \text{proc} + a_2 \text{fugacity} + a_3 \text{vent} + a_4 \text{dur} \\ & + a_5 \text{conc} + a_6 \text{lev} \\ & + a_7 \text{area_moel} + a_8 (\text{worker_count_g}) \end{aligned}$$

다중 회귀분석 결과 각 회귀식의 성능과 관계되는 자료는 <부록>에 추가로 제시하였다.

4) 통계분석 및 시각화

연구에 적용된 통계분석과 시각화는 R 프로그램(버전 4.3.1)을 이용하였으며, 수집된 데이터의 정리는 마이크로소프트사의 Excel(버전 2016)을 이용하였다.

Ⅲ. 연구결과



Ⅲ. 연구결과

1. 연구대상 선정

1) 연구대상 노출평가 도구

(1) 연구대상 노출평가 도구 선정

본 연구의 노출평가 모델 평가의 근간이 되는 자료를 작업환경측정결과로 하고 있으나, 해당 자료는 노출평가 모델에서 요구하는 자료를 수집하고 추론(필요 시) 하는데 상당히 제한적이다. 따라서 이미 개발되어 사용 중인 정량적 노출평가 모델 중 작업환경측정결과 자료의 활용이 가능하도록 하는 ECETOC TRA 모델의 최신 버전(3.2)을 연구대상 노출평가 모델로 선정하였다.

ECETOC TRA 모델은 유럽 화학물질 독성 및 생태 독성센터(European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemical, ECETOC)에서 개발한 화학물질 위해도 평가 도구(Targeted Risk Assessment, TRA)이며, 유럽화학물질청(European Chemical Agency, 이하 ECHA)에서 발간한 가이드 guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.14: Occupational exposure assessment(version 3.0, 2016)와 국립환경과학원 발간 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침(2021) 등에 노출 추정 모델로 제시되고 있다. ECETOC TRA 모델은 간단한 입력 정보로 노출량 추정이 가능한 tier1 모델이며, 웹 기반의 초기 버전과 달리 2009년 버전2부터는 Excel 형태로 제공되어 사용자가 다운로드 받아 사용 가능하다는 점 등이 타 모델 대비 상기 언급한 작업환경측정결과의 활용에 있어 용이하다.

ECETOC TRA 외 tier1 모델에는 EKMG-Expo-Tool이 있으며, 필요 시 더 높은 tier의 모델(tier 1.5 : Stoffenmanager, tier 2.0 : Advanced REACH

Tool, 이하 ART)의 사용이 권고되고 있다.

ECETOC TRA는 작업자 노출 평가와 함께 소비자 및 환경에 대한 노출평가가 가능하며, 작업자의 노출을 평가하는 경우 8시간 및 단기 흡입뿐 아니라, 피부에 대한 8시간 및 국부 노출의 평가 기능도 제공하고 있다. 본 연구에서는 작업 환경측정결과에서 입수가능한 자료를 감안하여 8시간 흡입노출만을 평가대상으로 하였다.

ECETOC TRA(버전 3.2)에서 작업자 흡입 노출을 평가하는데 필요한 입력 변수는 <표 III-1>과 같다.

<표 III-1> ECETOC TRA(버전 3.2)에서 작업자 흡입 노출을 평가하는데 필요한 입력변수

입력변수	입력값
○ 화학물질의 물리화학적 특성	
▶ 물리적 상태	liquid/solid
▶ 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity)	very low / low / medium / high
○ 작업조건(Operational Condition, OC)	
▶ 작업환경 유형(Type of setting : 산업용/전문가용)	ind/prof
▶ 공정범주(Process Category, PROC)	proc1~28
▶ 노출시간(duration)	<15min / 15min-1hr / 1-4hr / >4hr
▶ 제품내 화학물질의 농도(concentration)	<1% / 1-5% / 5-25% / >25%
○ 위험성 관리대책(Risk Management Measures, RMM)	
▶ 국소배기장치 설치 여부	yes/no
	outdoors
▶ 환기방식	indoors - no or basic ventilation indoors - good ventilation indoors - enhanced ventilation
▶ 호흡용 보호구 착용 여부 및 효율	no PPE / PPE80% / PPE90% / PPE95%

※ 이외 화학물질명, CAS 번호, 분자량, 노출기준 또는 DNEL 등 장·단기 참고값, 장갑 착용 여부 및 효율, 피부 보호 기능이 있는 국소배기장치 여부 등 입력변수가 있으나, 화학물질명, CAS 번호, 분자량은 노출량 산출결과에 영향을 주지 않으며, 노출기준 또는 DNEL 등 장·단기 참고값은 위해도 결정 단계에서 필요하나 노출량 산출에는 불필요함. 장갑 착용 여부 및 효율, 피부 보호 기능이 있는 국소배기장치 여부 등은 피부 노출평가에만 영향을 줌.

(2) ECETOC TRA 로직 분석 및 이해

가) ECETOC TRA 초기 노출 추정값에 대한 회귀분석

ECETOC TRA Excel 분석 결과, ECETOC TRA의 흡입 노출 추정값은 PROC(공정범주), 물리적 상태, 국소배기장치 설치·가동 여부, 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity), 작업환경 유형(type of setting : 산업용/전문가용) 등 5개의 변수에 따라 초기 노출 추정값을 산출하고, 이에 몇 가지 변수로 조정하여 8시간 노출 추정값과 단시간 노출 추정값을 최종 산출한다.

상기 열거한 5개 변수와 초기 노출 추정값을 대상으로 다중선형 회귀분석을 한 결과는 <표 III-2>와 같다. 모든 변수는 범주형 변수로 각 독립변수의 개별 값마다 계수가 산출되었다. 가정한 독립변수와 종속변수 간의 선형관계와 개별 독립변수들의 계수를 통해 각 독립변수가 종속변수의 결과에 기여하는 정도를 정량적으로 확인할 수 있다. 이번 다중선형 회귀분석에는 직업적 노출이 일반적으로 대수정규분포를 따른다고 알려져 있으므로 초기 노출 추정값에 밀이 10인 상용로그를 적용하여 회귀적합하였다.

회귀분석결과,

$$\log\text{초기값} = a_0 + a_1\text{proc} + a_2\text{state} + a_3\text{lev} + a_4\text{fugacity} + a_5\text{type_of_setting}$$

의 식에서 각 계수(a)가 <표 III-2>와 같이 산출되었다. 각 변수와 로그변환된 노출 초기값은 통계적으로 유의한 연관성이 있는 것으로 분석되었다($F(21, 556) = 118.3, p < 0.001$). 또한 적합된 회귀식의 조정된 결정계수(R^2)는 0.861로 분석되었다.

위에서 산출된 회귀식에 따르면, 아래와 같은 조건에서 다음의 관계가 도출되며, 조건에 따라 다른 관계가 도출된다.

- PROC : PROC13
- 물리적 상태 : 액체

- 국소배기장치 : 설치
- 증기의 휘발정도 : 중간
- 작업환경 유형 : 산업용

$$\rightarrow \log\text{초기노출추정값} = 2.52 + 0 - 0.03 - 0.6 + 0$$

독립변수간 다중공선성(VIF)은 모두 10 미만이었다.

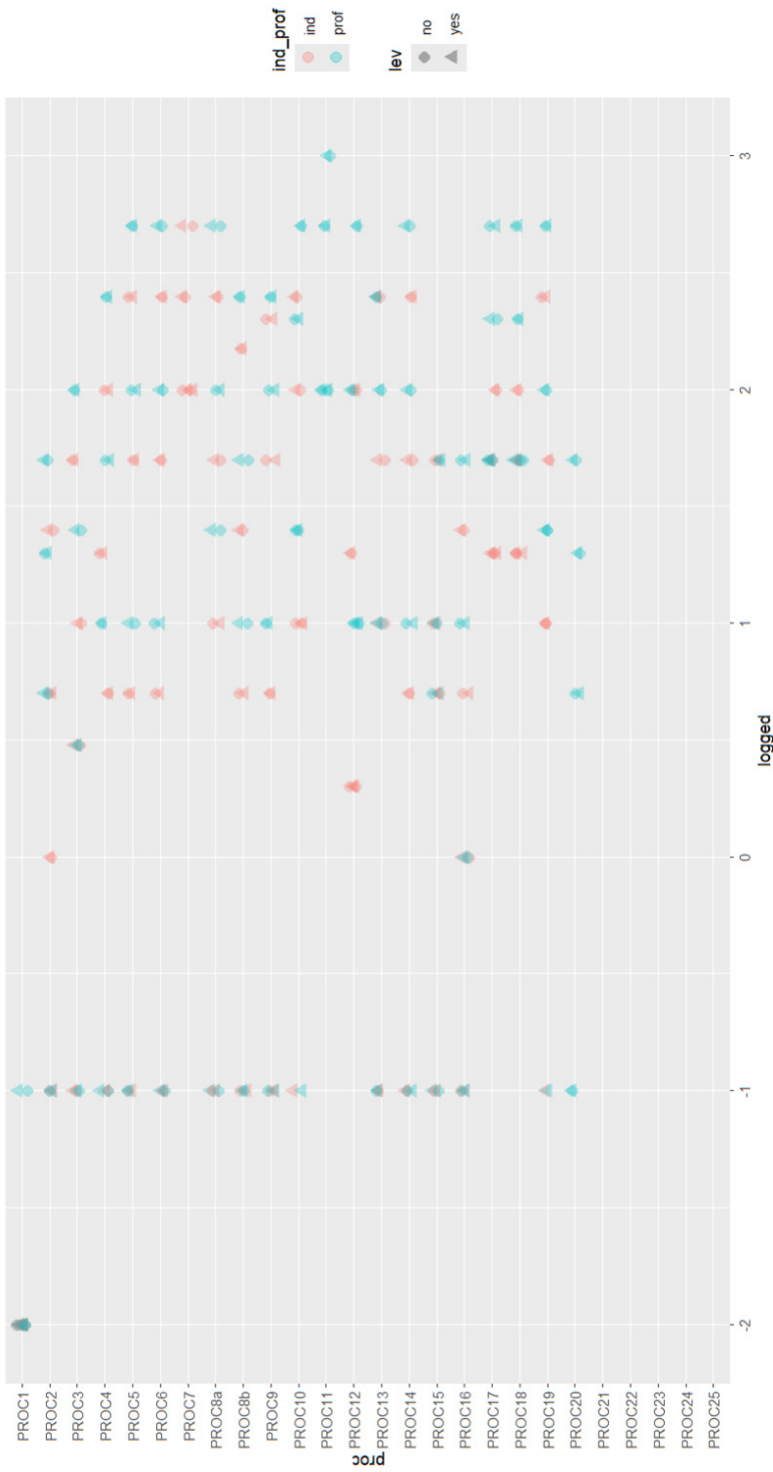
정량적인 분석에 더해 추가적인 이해를 돕기 위해 로그변환된 초기 노출 추정값을 한 축으로 하고 PROC을 다른 한축으로 하여 시각화 하였으며, 그 결과는 액체, 고체의 물리적 상태에 따라 <그림 III-1>, <그림 III-2>와 같다.

특징적인 것은 고체보다는 액체에 대한 초기 노출 추정값이 높으며, 전문가 용이 산업용보다 전체적으로 초기 노출 추정값이 높게 형성된다는 것이다. 또한 상기 회귀식의 계수에서 확인 가능한 것처럼 PROC, 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity), 물리적 상태에 따른 초기 노출 추정값의 변이에 비해 작업환경 유형에 따른 초기 노출 추정값의 변이는 크지 않았으며, 국소 배기장치 설치·가동 여부에 따른 초기 노출 추정값의 차이는 특히 작은 것을 확인할 수 있다.

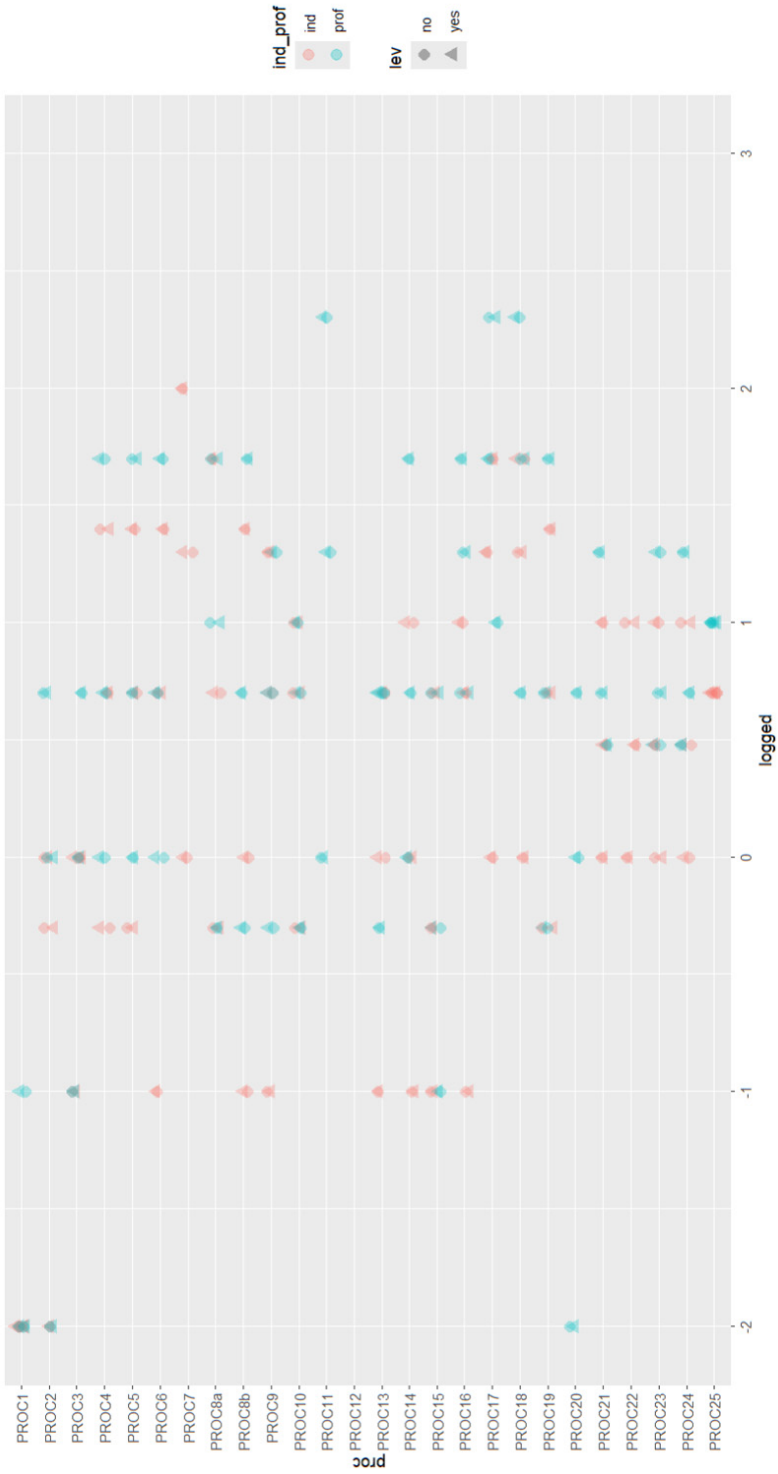
〈표 III-2〉 ECETOC TRA 초기값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	-0.59465	0.09692	-6.135	1.61e-09 ***
PROC	PROC2	1.87099	0.12116	15.442	< 2e-16 ***
	PROC3	2.12501	0.12116	17.538	< 2e-16 ***
	PROC4	2.66362	0.12116	21.984	< 2e-16 ***
	PROC5	2.76348	0.12116	22.808	< 2e-16 ***
	PROC6	2.71355	0.12116	22.396	< 2e-16 ***
	PROC7	3.78577	0.14967	25.294	< 2e-16 ***
	PROC8a	2.83491	0.12116	23.397	< 2e-16 ***
	PROC8b	2.56177	0.12116	21.143	< 2e-16 ***
	PROC9	2.62828	0.12116	21.692	< 2e-16 ***
	PROC10	2.91362	0.12116	24.047	< 2e-16 ***
	PROC11	3.59980	0.14967	24.051	< 2e-16 ***
	PROC12	2.92739	0.14312	20.454	< 2e-16 ***
	PROC13	2.52077	0.12116	20.805	< 2e-16 ***
	PROC14	2.63520	0.12116	21.749	< 2e-16 ***
	PROC15	2.11370	0.12116	17.445	< 2e-16 ***
	PROC16	2.37099	0.12116	19.568	< 2e-16 ***
	PROC17	3.47850	0.12116	28.709	< 2e-16 ***
	PROC18	3.45700	0.12116	28.532	< 2e-16 ***
	PROC19	2.94897	0.12116	24.339	< 2e-16 ***
	PROC20	1.89936	0.14967	12.69	< 2e-16 ***
	PROC21	2.85619	0.1581	18.065	< 2e-16 ***
	PROC22	2.84702	0.20617	13.809	< 2e-16 ***
	PROC23	2.85619	0.1581	18.065	< 2e-16 ***
	PROC24	2.85619	0.1581	18.065	< 2e-16 ***
	PROC25	3.04664	0.1581	19.27	< 2e-16 ***
Physical State	solid	-1.06780	0.04289	-24.895	< 2e-16 ***
LEV	yes	-0.02992	0.03739	-0.800	0.424
Fugacity	low	-1.42184	0.04917	-28.915	< 2e-16 ***
	medium	-0.60987	0.04917	-12.402	< 2e-16 ***
	very_low	-2.56837	0.06572	-39.08	< 2e-16 ***
Type of Setting	prof	0.31498	0.03902	8.073	4.28e-15 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



[그림 Ⅲ-1] ECETOC TRA 초기설정값과 각 변수와의 관계(액체)



[그림 III-2] ECETOC TRA 초기설정값과 각 변수와의 관계(고체)

나) ECETOC TRA 최종 노출 추정값에 대한 회귀분석

8시간 노출

앞서 기술한 대로 ECETOC TRA는 일부 변수로 초기 노출 추정값을 산출하고, 이에 몇 가지 변수로 조정하여 8시간 노출 추정값과 단시간 노출 추정값을 최종 산출한다.

최종 산출된 8시간 노출 추정값과 ECETOC TRA에 입력하는 모든 변수와의 정량적 관계를 확인하고자 각 변수가 가능한 모든 조건을 조합(총 139,776건의 경우의 수 : PROC 26; 작업환경 유형 2; 물리적 상태 2; 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity) 액체의 경우 4, 고체의 경우 3; 환기방식 4; 노출시간 4; 함유량 4; 국소배기장치 2; 호흡용 보호구 3)하여 데이터를 생성하였으며, 이 중 일부 데이터를 <표 III-3>의 사유에 따라 제외한 뒤, 남은 91,632건의 데이터에 대해 아래 식의 계수를 구하는 다중선형 회귀분석을 실시하였다. 환기방식, 노출시간, 함유량, 호흡용 보호구 등 변수는 초기 노출 추정값 산출에는 이용되지 않았던 변수이다.

$$\begin{aligned} \log 8\text{시간노출추정값} = & a_0 + a_1\text{proc} + a_2\text{state} + a_3\text{lev} + a_4\text{fugacity} + \\ & a_5\text{type_of_setting} + a_6\text{vent} + a_7\text{dur} + a_8\text{conc} \\ & + a_9\text{rpe} \end{aligned}$$

상기 9개 변수와 최종 노출값을 대상으로 다중선형 회귀분석을 한 결과는 <표 III-4>와 같다. 모든 변수는 범주형 변수로 각 독립변수의 개별 값마다 계수가 산출되었다. 가정한 독립변수와 종속변수 간의 선형관계와 개별 독립변수들의 계수를 통해 각 독립변수가 종속변수의 결과에 기여하는 정도를 정량적으로 확인할 수 있다. 이번 다중선형 회귀분석에는 초기 노출 추정값에 대한 회귀분석과 마찬가지로 직업적 노출이 일반적으로 대수정규분포를 따른다고 알려져 있으므로 최종 노출 추정값에 밀이 10인 상용로그를 적용하여 회귀적합하였다.

회귀분석결과 각 변수와 로그변환된 최종 노출 추정값은 통계적으로 유의한

연관성이 있는 것으로 분석되었다($F(42, 91589) = 2427, p < 0.001$). 또한 적합된 회귀식의 조정된 결정계수(R²)는 0.918로 분석되었다.

독립변수간 다중공선성(VIF)은 모두 10 미만이었다.

정량적인 분석에 더해 추가적인 이해를 돕기 위해 로그변환된 최종 노출 추정값을 한 축으로 하고 PROC을 다른 한축으로 하여 시각화하였으며, 그 결과는 액체, 고체의 물리적 상태에 따라 <그림 III-3>, <그림 III-4>와 같다.

ECETOC TRA 노출량 추정 Excel 파일에서 제공하는 산식으로는 8시간 흡입 노출량 추정 시, 환기방식에 따라 ‘야외’는 0.7, ‘실내-좋은 환기’는 0.7, ‘실내-향상된 환기’는 0.3을 초기 노출 추정값에 곱해 감한다. 노출시간에 따른 삭감의 경우 ‘15분 미만’ 노출 시 0.1, ‘15분에서 1시간’ 노출 시 0.2, ‘1시간에서 4시간’ 노출 시 0.6을 초기 노출 추정값에 곱하여 적용한다. 화학제품 내의 화학물질 농도 범위 ‘1% 미만’, ‘1에서 5%’, ‘5에서 25%’에 따라 0.1, 0.2, 0.6을 초기 노출 추정값에 각각 곱해 감한다. 본 연구와는 관계없지만 호흡용 보호구의 착용과 그 효율에 따른 노출량 감소도 적용되는데, 그 값은 보호구 효율 90%, 95%에 따라 0.1, 0.05를 각각 적용한다.

<표 III-3> ECETOC TRA 흡입 노출 추정이 제한되는 변수 조합

-
- ✓ 고체에 대해 ‘very low’ 흘날림 정도는 허용되지 않음
 - ✓ 환기방식 중 ‘야외’와 ‘국소배기장치’의 조합은 허용되지 않음
 - ✓ ‘전문가용’ 작업환경 유형에서 ‘실내 - 향상된 환기’와 ‘국소배기장치’의 조합은 허용되지 않음
 - ✓ ‘PROC11’ 및 ‘PROC21’은 ‘전문가용’ 작업환경 유형에 적용되지 않음
 - ✓ ‘PROC22’ ~ ‘PROC25’는 ‘액체’ 상태에 적용되지 않음
-

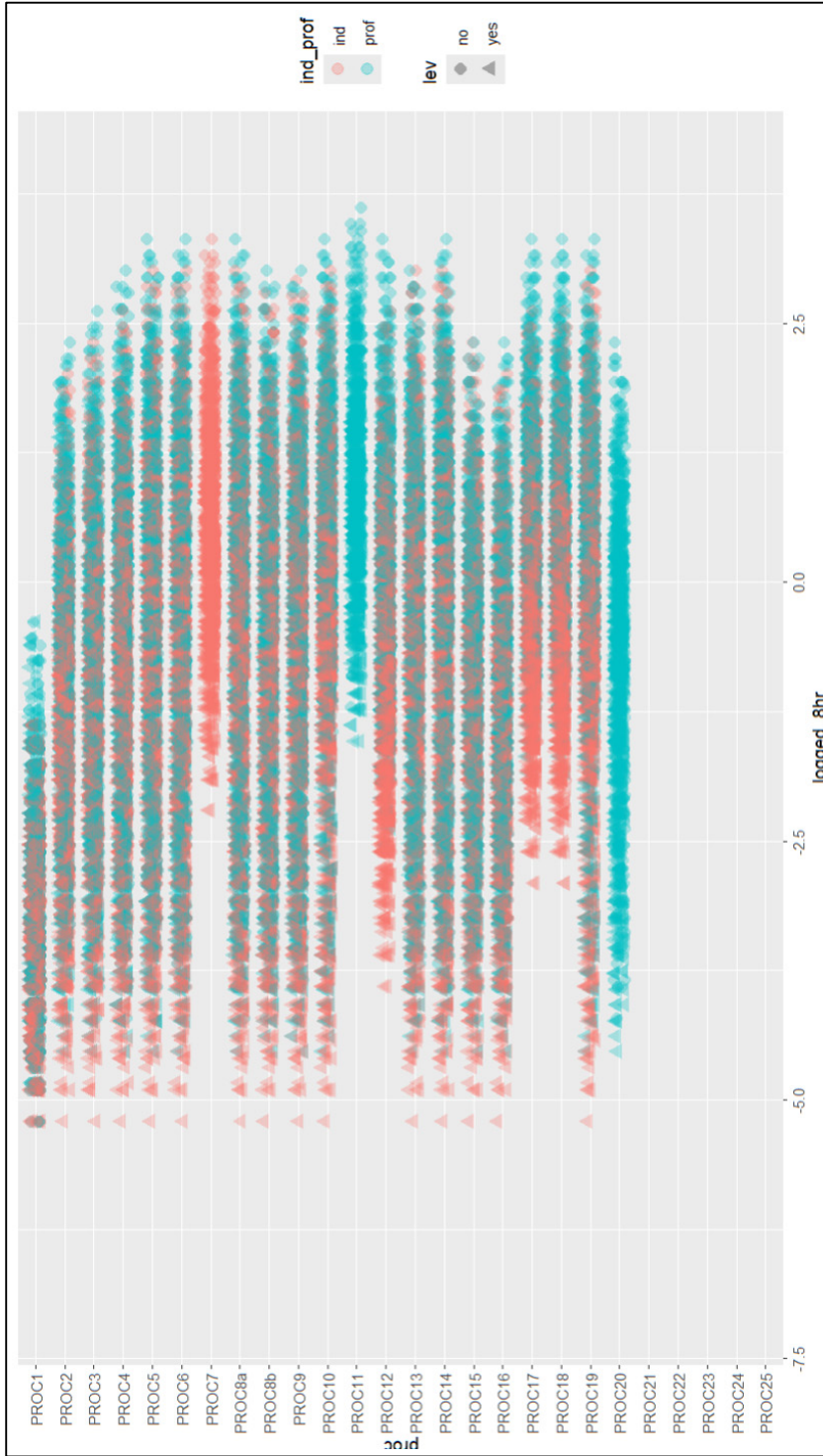
〈표 III-4〉 ECETOC TRA 8시간 노출 추정값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	-2.259724	0.009209	-245.39	<2e-16 ***
PROC	PROC2	1.529371	0.009766	156.59	<2e-16 ***
	PROC3	1.790008	0.009766	183.28	<2e-16 ***
	PROC4	2.326969	0.009766	238.26	<2e-16 ***
	PROC5	2.427887	0.009766	248.59	<2e-16 ***
	PROC6	2.374120	0.009766	243.09	<2e-16 ***
	PROC7	3.442418	0.011764	292.63	<2e-16 ***
	PROC8a	2.500437	0.009766	256.02	<2e-16 ***
	PROC8b	2.220587	0.009766	227.37	<2e-16 ***
	PROC9	2.293277	0.009766	234.81	<2e-16 ***
	PROC10	2.617057	0.009766	267.96	<2e-16 ***
	PROC11	3.264933	0.012406	263.17	<2e-16 ***
	PROC12	2.568917	0.011536	222.68	<2e-16 ***
	PROC13	2.184112	0.009766	223.63	<2e-16 ***
	PROC14	2.289742	0.009766	234.45	<2e-16 ***
	PROC15	1.786378	0.009766	182.91	<2e-16 ***
	PROC16	2.023876	0.009766	207.23	<2e-16 ***
	PROC17	3.128668	0.009766	320.35	<2e-16 ***
	PROC18	3.108820	0.009766	318.31	<2e-16 ***
	PROC19	2.650749	0.009766	271.41	<2e-16 ***
	PROC20	1.564492	0.012406	126.11	<2e-16 ***
	PROC21	2.521750	0.012744	197.87	<2e-16 ***
	PROC22	2.509365	0.016122	155.65	<2e-16 ***
	PROC23	2.521750	0.012744	197.87	<2e-16 ***
	PROC24	2.606128	0.012744	204.49	<2e-16 ***
	PROC25	2.713437	0.012744	212.91	<2e-16 ***
Physical State	solid	-1.688541	0.003461	-487.89	<2e-16 ***
LEV	yes	-0.855109	0.003354	-254.99	<2e-16 ***
Fugacity	low	-1.420855	0.003965	-358.31	<2e-16 ***
	medium	-0.607039	0.003965	-153.08	<2e-16 ***
	very_low	-2.531026	0.005302	-477.35	<2e-16 ***

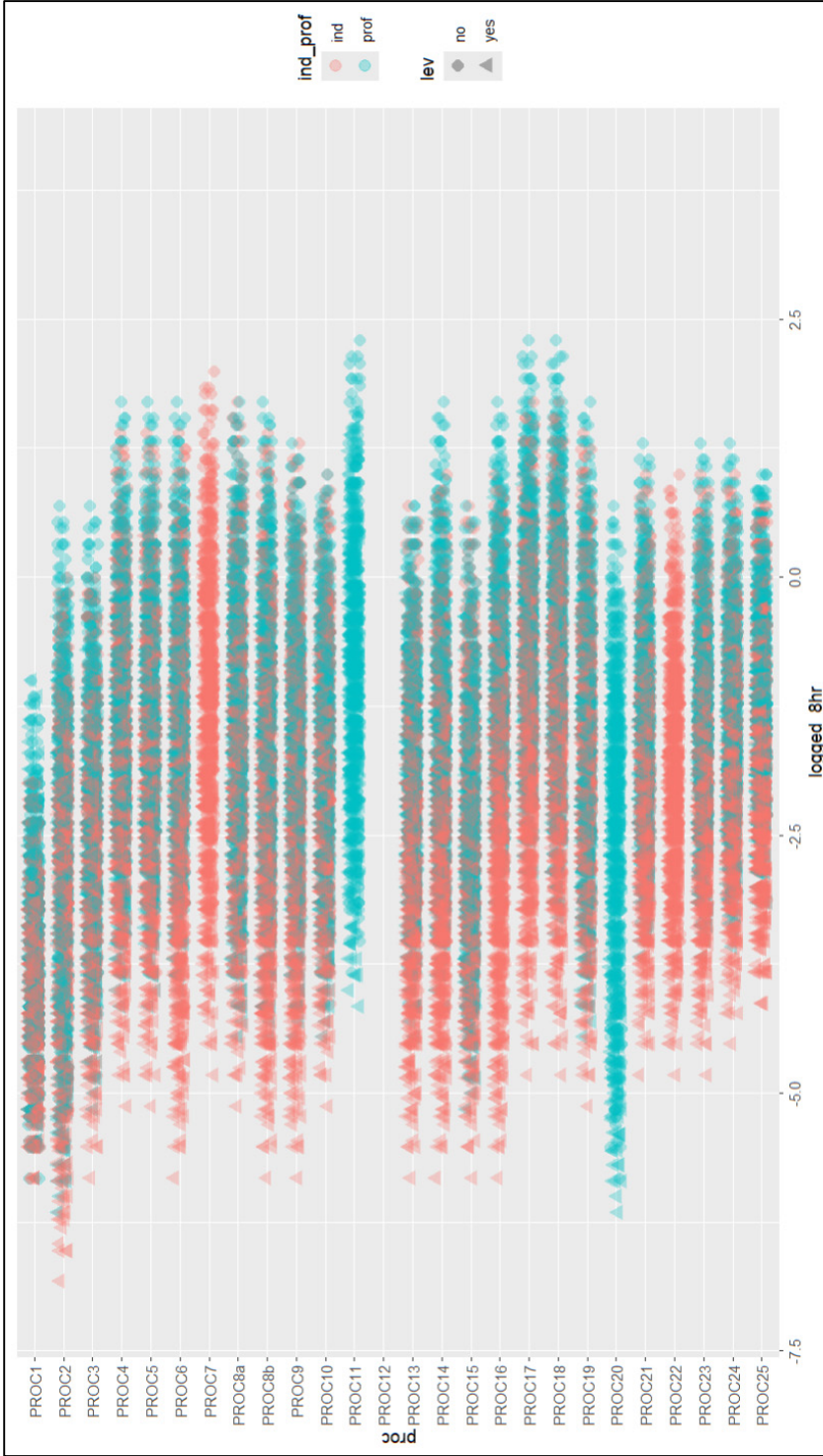
〈표 III-4〉 (계속)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
Type of Setting	prof	0.416929	0.003203	130.15	<2e-16 ***
Ventilation	indoors – good ventilation	0.401377	0.004234	94.81	<2e-16 ***
	indoors – no or basic ventilation	0.556278	0.004234	131.40	<2e-16 ***
	outdoors	0.390244	0.005100	76.52	<2e-16 ***
Duration	>4hr	0.999998	0.004265	234.48	<2e-16 ***
	1~4hr	0.778150	0.004265	182.46	<2e-16 ***
	15min~1hr	0.301028	0.004265	70.59	<2e-16 ***
Concentration	>25%	0.999998	0.004265	234.48	<2e-16 ***
	1~5%	0.301028	0.004265	70.59	<2e-16 ***
	5~25%	0.778150	0.004265	182.46	<2e-16 ***
RPE	RPE90%	-1.000000	0.003693	-270.76	<2e-16 ***
	RPE95%	-1.301029	0.003693	-352.27	<2e-16 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



[그림 III-3] ECETOC TRA 8시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(액체)



[그림 III-4] ECETOC TRA 8시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(고체)

단시간 노출

8시간 노출 추정값과 마찬가지로 단시간 노출 추정값과 ECETOC TRA에 입력하는 모든 변수와의 정량적 관계를 확인하고자 각 변수가 가능한 모든 조건을 조합(총 139,776건의 경우의 수 : PROC 26; 작업환경 유형 2; 물리적 상태 2; 증기의 휘발정도 또는 고체의 날림정도(fugacity) 액체의 경우 4, 고체의 경우 3; 환기방식 4; 노출시간 4; 함유량 4; 국소배기장치 2; 호흡용 보호구 3)하여 데이터를 생성하였다.

마찬가지로 생성된 데이터를 통해 아래 식의 계수를 구하는 다중선형 회귀 분석을 실시하였다.

$$\begin{aligned} \log\text{단시간노출추정값} = & a_0 + a_1\text{proc} + a_2\text{state} + a_3\text{lev} + a_4\text{fugacity} \\ & + a_5\text{type_of_setting} + a_6\text{vent} + a_7\text{dur} + \\ & a_8\text{conc} + a_9\text{rpe} \end{aligned}$$

상기 9개 변수와 최종 단시간 노출 추정값을 대상으로 다중선형 회귀분석을 한 결과는 <표 III-5>와 같다. 모든 변수는 범주형 변수로 각 독립변수의 개별 값마다 계수가 산출되었다. 가정한 독립변수와 종속변수 간의 선형관계와 개별 독립변수들의 계수를 통해 각 독립변수가 종속변수의 결과에 기여하는 정도를 정량적으로 확인할 수 있다. 이번 다중선형 회귀분석에는 초기 노출 추정값에 대한 회귀분석과 마찬가지로 직업적 노출이 일반적으로 대수정규분포를 따른다고 알려져 있으므로 최종 노출 추정값에 밑이 10인 상용로그를 적용하여 회귀적합하였다.

회귀분석결과 각 변수와 로그변환된 최종 노출 추정값은 통계적으로 유의한 연관성이 있는 것으로 분석되었다($F(42, 91589) = 1987, p < 0.001$). 또한 적합된 회귀식의 조정된 결정계수(R²)는 0.901로 분석되었다.

독립변수간 다중공선성(VIF)은 모두 10 미만이었다.

정량적인 분석에 더해 추가적인 이해를 돕기 위해 로그변환된 최종 노출 추정값을 한 축으로 하고 PROC을 다른 한축으로 하여 시각화한 결과는 액체,

고체의 물리적 상태에 따라 <그림 III-5>, <그림 III-6>와 같다.

ECETOC TRA 노출량 추정 Excel 파일에서 제공하는 산식으로는 단시간 흡입 노출량 추정 시, 8시간 흡입노출 추정값에 물리적 상태, PROC을 고려하여 1 또는 4의 승수를 곱하고 동시에 노출시간에 따라 ‘15분 미만’ 노출 시 0.1, ‘15분에서 1시간’ 노출 시 0.2, ‘1시간에서 4시간’ 노출 시 0.6을 각각 나누어서 산출한다.

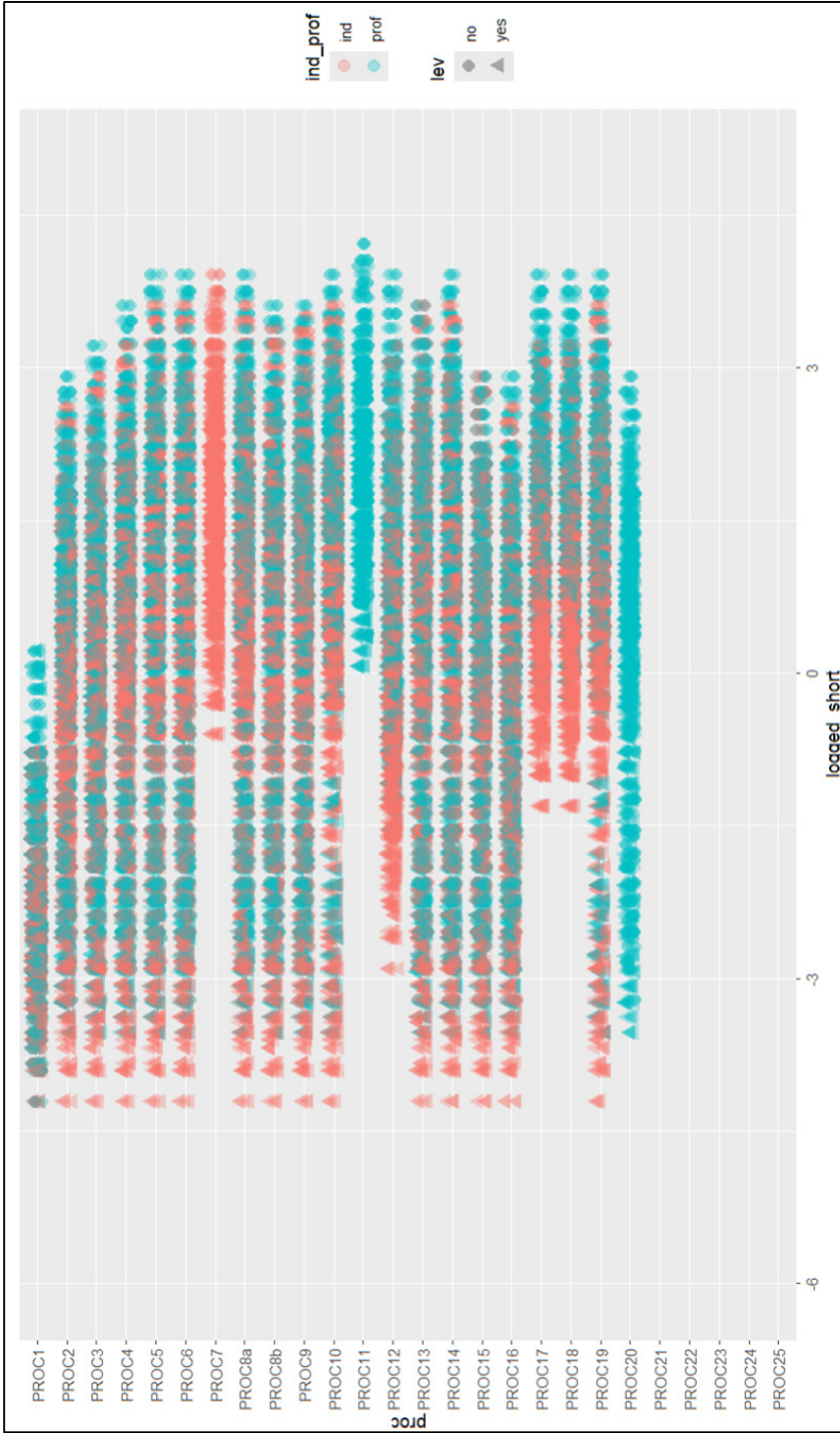
<표 III-5> ECETOC TRA 단시간 노출 추정값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	-0.673	0.0102	-65.96	<2e-16 ***
PROC	PROC2	1.53	0.0108	141.44	<2e-16 ***
	PROC3	1.79	0.0108	165.55	<2e-16 ***
	PROC4	2.33	0.0108	215.21	<2e-16 ***
	PROC5	2.43	0.0108	224.54	<2e-16 ***
	PROC6	2.37	0.0108	219.57	<2e-16 ***
	PROC7	3.53	0.013	270.95	<2e-16 ***
	PROC8a	2.5	0.0108	231.25	<2e-16 ***
	PROC8b	2.22	0.0108	205.37	<2e-16 ***
	PROC9	2.29	0.0108	212.09	<2e-16 ***
	PROC10	2.67	0.0108	246.93	<2e-16 ***
	PROC11	3.35	0.0137	243.94	<2e-16 ***
	PROC12	2.55	0.0128	199.97	<2e-16 ***
	PROC13	2.18	0.0108	202	<2e-16 ***
	PROC14	2.29	0.0108	211.76	<2e-16 ***
	PROC15	1.79	0.0108	165.21	<2e-16 ***
	PROC16	2.02	0.0108	187.18	<2e-16 ***
	PROC17	3.22	0.0108	297.31	<2e-16 ***
	PROC18	3.2	0.0108	295.47	<2e-16 ***
	PROC19	2.7	0.0108	250.05	<2e-16 ***
	PROC20	1.56	0.0137	113.87	<2e-16 ***
	PROC21	2.54	0.0141	180.12	<2e-16 ***

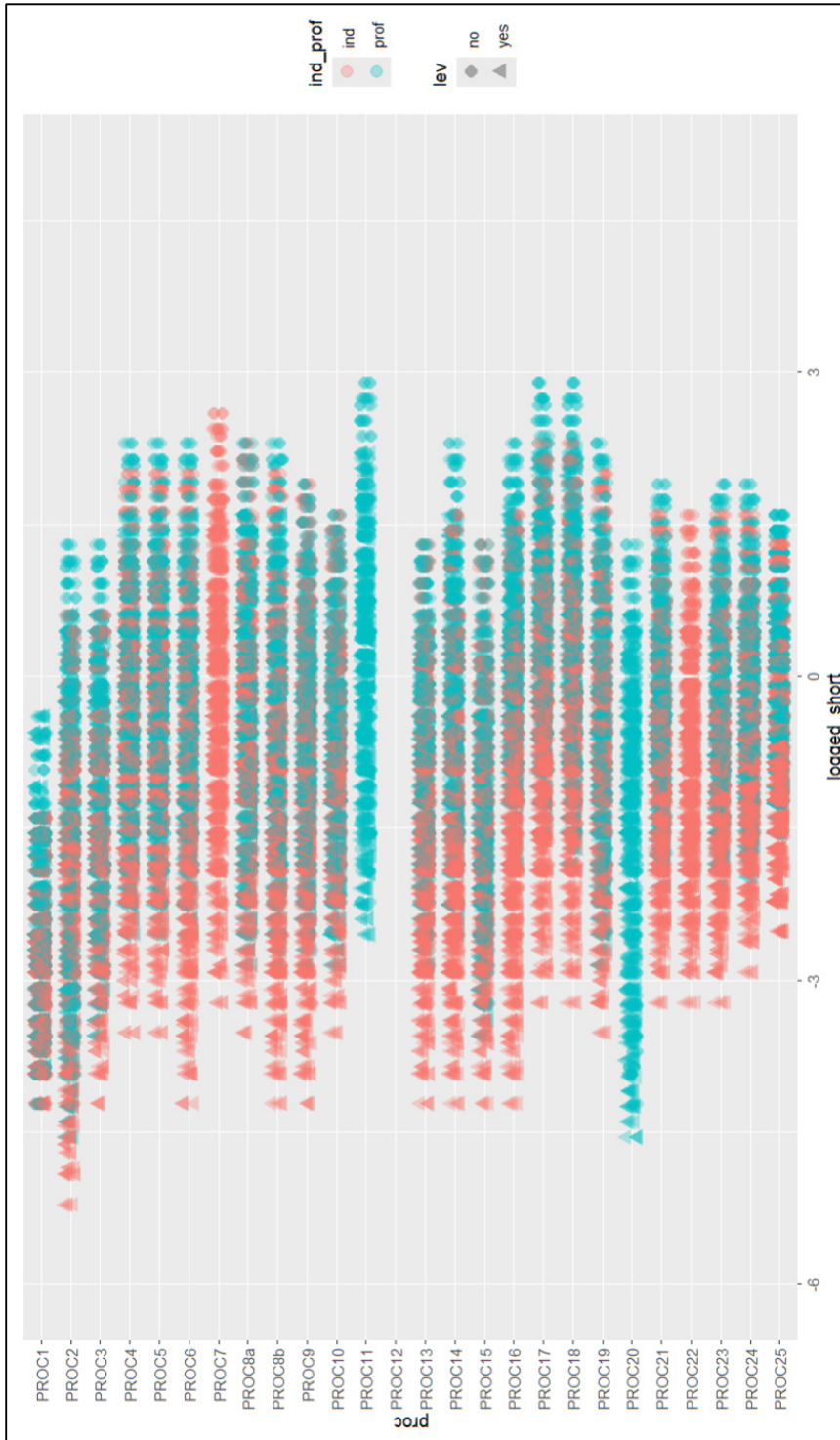
〈표 III-5〉 (계속)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
PROC	PROC22	2.53	0.0179	141.71	<2e-16 ***
	PROC23	2.54	0.0141	180.12	<2e-16 ***
	PROC24	2.63	0.0141	186.1	<2e-16 ***
	PROC25	2.73	0.0141	193.71	<2e-16 ***
Physical State	solid	0.417	0.00355	117.58	<2e-16 ***
LEV	yes	-1.69	0.00383	-441.14	<2e-16 ***
Fugacity	low	-1.42	0.00439	-323.64	<2e-16 ***
	medium	-0.607	0.00439	-138.27	<2e-16 ***
	very_low	-3.00	0.00587	-511.43	<2e-16 ***
Type of Setting	prof	0.4014	0.004687	85.64	<2e-16 ***
Ventilation	indoors - good ventilation	0.5563	0.004687	118.69	<2e-16 ***
	indoors - no or basic ventilation	0.3903	0.005646	69.12	<2e-16 ***
	outdoors	-2.81e-14	0.004722	0.00	1
Duration	>4hr	-2.811e-14	0.004722	0.00	1
	1~4hr	-2.768e-14	0.004722	0.00	1
	15min~1hr	1	0.004722	211.79	<2e-16 ***
Concentration	>25%	0.301	0.004722	63.76	<2e-16 ***
	1~5%	0.7782	0.004722	164.81	<2e-16 ***
	5~25%	-0.8633	0.003713	-232.53	<2e-16 ***
RPE	RPE90%	-1	0.004089	-244.56	<2e-16 ***
	RPE95%	-1.301	0.004089	-318.18	<2e-16 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



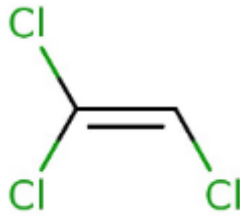
[그림 III-5] ECETOC TRA 단시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(액체)



[그림 III-6] ECETOC TRA 단시간 노출 추정값과 각 변수와의 관계(고체)

2) 연구대상 유해인자

트리클로로에틸렌의 화학식은 C_2HCl_3 이며, 특징적인 냄새가 나는 무색의 액체이다. 화학적 구조는 <그림 III-7>과 같고, ECHA의 조화분류에 따르면 GHS 기준 유해성의 분류는 피부자극성, 눈 자극성, 특정표적장기독성(반복노출) 구분3(마취작용), 생식세포 변이원성 구분2, 발암성 구분1B, 만성 수생환경 유해성 구분3 등이며 그에 따른 그림문자는 <그림 III-8>과 같다.



[그림 III-7] 트리클로로에틸렌의 구조



[그림 III-8] ECHA 조화분류에 따른 트리클로로에틸렌 유해성 그림문자

〈표 III-6〉 유기화합물 특별관리물질 중 5년간(18~22년) 측정시료수 및 불검출률(%)

화학물질	전체 시료	불검출률(%)
디니트로톨루엔	447	98.66%
N,N-디메틸아세트아미드	19,565	90.92%
디메틸포름아미드	48,342	86.93%
1,2-디클로로에탄	6,834	95.83%
1,2-디클로로프로판	7,195	78.76%
2-메톡시에탄올	12,021	97.00%
2-메톡시에틸아세테이트	2,461	91.02%
벤젠	46,215	94.25%
1,3-부타디엔	17,279	93.77%
1-브로모프로판	4,271	68.81%
2-브로모프로판	414	99.28%
사염화탄소	2,093	98.71%
스토다드솔벤트	4,448	80.53%
아크릴로니트릴	13,696	96.78%
아크릴아미드	12,844	96.49%
2-에톡시에탄올	33,412	91.46%
2-에톡시에틸아세테이트	45,739	92.55%
에틸렌이민	4	100.00%
2,3-에폭시-1-프로판올	188	100.00%
1,2-에폭시프로판	3,222	93.92%
에피클로로하이드린	5,108	97.63%
트리클로로에틸렌	25,234	61.44%
1,2,3-트리클로로프로판	286	100.00%
퍼클로로에틸렌	7,993	88.92%
페놀	56,298	94.98%
포름알데히드	130,122	31.23%
황산디메틸	1,177	100.00%
하이드라진	3,159	97.31%

※ 포름알데히드 또한 시료수가 많고 불검출이 적으나, 물리적 상태가 기체로서 연구대상 노출평가 모델인 ECETOC TRA의 적용에 다소 부적합.

〈표 III-7〉 트리클로로에틸렌에 대한 ECETOC TRA 입력정보

○ 화학물질 정보
▶ 물질명 : 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene)
▶ CAS 번호 : 79-01-6
○ 물리화학적 특성
▶ 분자량 : 131.4 g/mol (출처 : ICSC)
▶ 증기압 : 7,800 Pa (출처 : ICSC)
○ 노출기준
▶ 8시간 TWA : 10 ppm (고용노동부 고시)
▶ STEL : 25 ppm (고용노동부 고시)

※ 노출온도에 따른 증기압은 Clausius-Clapeyron 공식을 사용하여 계산하여 노출량 산출 시 적용.

3) 연구대상 자료

선정된 연구대상 유해인자인 트리클로로에틸렌에 대하여 2018년도부터 2022년까지의 5개년 작업환경측정결과와 측정결과표에서 〈표 III-8〉과 같이 자료를 수집하였다.

해당 기간에 측정된 작업환경측정자료 현황을 보면, 8시간 TWA의 경우 서로 다른 2,672개소의 사업장에서 21,719건의 트리클로로에틸렌이 측정되었으며, 이는 평균적으로 연간 1,226개소에서 4,344건의 측정이 이루어진 것에 해당한다. 노출량 추정에 있어 특정 사업장의 동일 공정은 하나의 노출 시나리오 (exposure scenario, ES)를 구성한다.

〈표 III-8〉 작업환경측정결과에서의 수집 정보

- 사업장관리번호
 - ▶ 사업장의 동일노출그룹간 75th percentile값 등 계산 시 활용
- 사업장 정보(지역, 근로자수, 생산품)
- 공정정보 : 공정명, 단위작업장소, 세부 공정내용
 - ▶ 작업시간 → 노출시간
 - ▶ 작업내용 → PROC, 물질의 휘발정도(고온)
- 작업장 기온
 - ▶ 물질의 휘발정도
- 공정 및 공정별 유해인자
 - ▶ 단일물질 여부 및 혼합물 내 함유량
- 유해인자별 월간 사용량
 - ▶ 사용량 → PROC
- 작업환경 실태 및 문제점
 - ▶ 환기실태
 - ▶ 국소배기장치 설치 및 가동 여부
 - ▶ 호흡보호구 착용 실태
- 사업장 MSDS
 - ▶ 단일물질 여부 및 혼합물 내 함유량

〈표 III-9〉 2018~2022년 5년간 트리클로로에틸렌 8시간 TWA 측정현황

(단위 : 건, %)

	전체시료	검출	불검출	불검출률	노출기준 초과	초과율
합계	21,719	7,723	13,996	64.44%	167	0.77%
도금업	1,888	1,377	511	27.07%	10	0.53%
그 외 기타 전자 부품 제조업	1,783	994	789	44.25%	19	1.07%
자동차 종합 수리업	1,002	327	675	67.37%	0	0.00%
완제 의약품 제조업	984	14	970	98.58%	0	0.00%
그 외 자동차용 신품 부품 제조업	725	304	421	58.07%	5	0.69%
도장 및 기타 피막 처리업	604	352	252	41.72%	13	2.15%
원유 정제처리업	555	8	547	98.56%	0	0.00%
그 외 기타 달리 분류되지 않은 제품 제조업	372	119	253	68.01%	2	0.54%
인쇄회로기판용 적층판 제조업	323	217	106	32.82%	0	0.00%
그 외 기타 금속 가공업	318	152	166	52.20%	4	1.26%

※ 업종의 세세분류 기준 시료 수 상위 10개 업종만 표시

※ 노출기준 초과는 각 측정건별 트리클로로에틸렌 8시간 노출기준을 초과한 경우

〈표 III-10〉 2018~2022년 5년간 트리클로로에틸렌 단시간 노출수준 측정현황

(단위 : 건, %)

	전체시료	검출	불검출	불검출률	노출기준 초과	초과율
합계	3,515	2,006	1,509	42.93%	41	1.17%
도금업	1,027	838	189	18.40%	2	0.19%
자동차 종합 수리업	319	76	243	76.18%	0	0.00%
도장 및 기타 피막 처리업	196	145	51	26.02%	9	4.59%
그 외 기타 전자 부품 제조업	161	101	60	37.27%	2	1.24%
물질 성분 검사 및 분석업	118	9	109	92.37%	0	0.00%
그 외 기타 금속 가공업	85	48	37	43.53%	4	4.71%
그 외 자동차용 신품 부품 제조업	77	24	53	68.83%	5	6.49%
인쇄회로기판용 적층판 제조업	63	36	27	42.86%	0	0.00%
그 외 기타 달리 분류되지 않은 제품 제조업	57	41	16	28.07%	0	0.00%
그 외 기타 일반 목적용 기계 제조업	56	27	29	51.79%	0	0.00%

※ 업종의 세세분류 기준 시료 수 상위 10개 업종만 표시

※ 노출기준 초과는 각 측정건별 트리클로로에틸렌 STEL을 초과한 경우

2. 연구대상 자료 분석 및 노출변수 추출

1) 작업환경측정 결과표 분석 및 자료 추출

선정된 연구대상 유해인자인 트리클로로에틸렌에 대하여 각 사업장별로 작업환경측정결과표와 안전보건공단 신뢰성 평가결과를 확인하여 노출평가 모델 ECETOC TRA의 입력변수와 관련 있는 자료를 추출하였다.

그 결과로 ECETOC TRA에 적용 가능하거나 적용 가능하도록 변환이 가능한 작업환경측정결과표 상의 정보로 (1) 예비조사 항목의 작업공정별 유해요인 분포 실태, 작업공정별 유해요인 발생 실태, 작업환경측정대상 공정 및 유해인자별 측정계획, 공정별 유해화학물질 사용 상태, (2) 작업환경측정개요의 단위작업장소별 유해인자의 측정위치도(측정장소), (3) 단위작업장소별 작업환경측정결과의 부서 또는 공정, 단위작업장소, 작업장 기온 그리고 (4) 측정 결과에 따른 종합의견의 작업환경설비 실태 및 문제점, MSDS 별첨 자료 등으로 이를 각 사업장의 측정결과와 함께 Excel 자료로 정리하였다.

〈표 Ⅲ-11〉 작업환경측정결과표 상의 수집정보 정리 예시

생산품/부서명/ 공정명/ 단위작업장소	정보1	정보2	정보3
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 약세사리 도금 ✓ 마스크 ✓ 마스크 ✓ 마스크 	<p>마스크: 혼합유기화합물 (디클로로메탄, 트리클로로에틸렌) 이물질 제거 작업 시 화학물질 사용으로 디클로로메탄, 트리클로로에틸렌이 불규칙적으로 발생</p>	<p>마스크 디클로로메탄 불규칙 1 480(8) 마스크 디클로로메탄 사용 이물질제거 10 ℓ 마스크 트리클로로에틸렌 사용 이물질 제거 20 ℓ</p> <ul style="list-style-type: none"> • 작업장기온: 28 ℃ • 작업장습도: 43 % 	<p>마스크 작업 시 사용하는 화학물질은 소분용기에 덜어 사용하고 있었으며, 용기에 경고표시는 부착되어 있지 않았습니다. 마스크 작업점에는 별도의 국소배기장치는 설치되어 있지 않습니다.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓호텔, 잡화, 주류 ✓세탁실(객실침대 시트/타올정리/세탁기) ✓세탁실(객실침대 시트/타올정리/세탁기) ✓세탁실(객실침대 시트/타올정리/세탁기) 	<p>세탁실(객실침대시트/타올 정리/세탁기): 혼합유기화합물(2-에톡시에탄올, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알콜) 세탁실의 세탁기는 연속적으로 가동하고 있었으며 세제는 자동투입되는 형태였으며 세탁물 얼룩제거 작업은 불규칙적으로 이루어지고 있어 트리클로로에틸렌(STEL), 불화수소(STEL), 수산화나트륨 측정은 세탁기 가동시간 및 얼룩제거 작업 시간에 맞춰 15분간 측정하였습니다. 침대시트/타올 세탁기 가동 시 화학물질 사용으로 인해 트리클로로에틸렌 등 노출</p>	<p>세탁실(객실침대시트/타올정리/세탁기) 혼합유기화합물 (Em) 불규칙 8 480(8) 세탁실(객실침대시트/타올정리/세탁기) 트리클로로에틸렌(STEL) 불규칙 8 480(8)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 작업장기온: 20 ℃ • 작업장습도: 51 % 	<p>각 부서에 설치되어 있는 배기장치는 미가동 시 외부기류가 유입되는 형태였습니다. 설치되어 있는 배기장치는 미가동 시 외부기류가 유입되는 형태이므로 작업 전 가동하기 바람에 유입기류로 인해 작업영역 내로 유해인자가 확산되지 않도록 관리 바랍니다. 작업환경측정대상 유해인자는 공기중 비산으로 인해 작업자 호흡기 노출로 인한 건강장해를 유발하는 물질로 취급 시 적절한 보호구를 착용한 상태로 작업해야 합니다.</p>

〈표 III-12〉 작업환경측정결과표 분석 및 1차 정리결과 예시

용도	세척	세척	세척	세척	세척	세척
혼합/단일	단일	단일	단일	불명	불명	단일
피세척물	악세서리	도금 대상 제품	도금 대상 제품	도장 대상 차체	PET엿지	볼트, 너트
제거대상 오염	마스킹 잔여물	도금전 처리	도금전 처리	도장전처리	접착제	가공유
세척주기	불명	간헐적	주1회	불명	불명	주2회 TCE 드럼통 교체작업: 1회/3~4개월, 5분 미만/1회
세척 1회당 소요시간(분)	불명	불명	30	불명	불명	10~20
세척 1회당 노출시간(분)	불명	불명	불명	불명	불명	불명
세척방식 추정 키워드 from 측정결과표	소분용기	세척조	불명	불명	세척제를 헌옷을 묻혀서 이물질제거	자동세척기
월 사용량	20	15	20	불명	불명	40
월 사용량 단위	L	L	L	불명	불명	L
세척 방식/설비	불명	담금	불명	스프레이 작업(PROC7) 가능성 및 수작업(PROC19) 가능성 있음	수작업	담금
작업장 온도	28	0	17	6.9	22	24
세척온도	불명	불명	불명	6.9	22	불명
행금방식	불명	불명	불명	불명	불명	불명
건조방식	불명	불명	불명	불명	불명	세척기 내 건조
건조 1회당 소요시간(분)	불명	불명	불명	불명	불명	5
환기	불명	불명	불명	불량	불명	불명
국소배기장치	미설치	설치	불명	설치	미설치	설치
호흡보호구	미흡	불명	미흡	양호	불명	미흡

2) 추출자료 인코딩

작업환경측정결과표 및 신뢰성 평가결과 분석과 그 결과로 추출된 텍스트 자료를 1차로 구조화된 형태로 정리한 뒤 선정된 노출평가 모델에서 요구하는 변수에 맞게 인코딩하였다. 그 결과, 최초 21,719건의 트리클로로에틸렌 측정 데이터로부터 338개소에 대해 노출변수가 인코딩된 4,402건의 데이터와 357개의 노출시나리오(ES)로 정리되었다. 단일 사업장 내에서 작업장소에 따라 작업형태, 노출시간이 다른 경우 등 트리클로로에틸렌을 다른 노출조건으로 사용하는 경우 별도의 시나리오로 구분하였다.

3) 추출자료의 일반적 특성

작업환경측정결과표 등으로부터 정리된 데이터를 노출 시나리오 357건 별로 가공한 한 뒤 업종(세세분류), 근로자수, PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 국소배기장치 설치 여부, 호흡용 보호구 등의 변수에 따라 개괄적인 분석을 하여 <표 III-13>과 <그림 III-9>에 나타내었다.

업종으로는 ‘그 외 기타 전자 부품 제조업’이 12.9%, ‘도금업’이 10.6%, ‘자동차 종합 수리업’이 10.4% 등 3개 업종이 가장 높은 비율로 나타났다.

근로자수 기준 사업장 크기는 50인 이하의 사업장의 수가 약 79% 비율을 차지하여 압도적으로 많았다. PROC(공정범주)의 경우 세척제 용도로 주로 쓰이는 트리클로로에틸렌의 특성 상 담금작업(PROC13)의 비율이 약 58%로 현저히 많았으며, 일부 실험실 작업(10.1%), 수작업 형태(27.2%)로 대상 화학물질을 취급하고 있었다. 증기의 휘발정도(fugacity)를 보면, 많은 경우가 실온에서 취급하여 약 76% 비율이 중간 정도(medium)의 휘발성을 보였으며, 초음파 세척조에서의 증기탈지 등 가열을 하는 경우로 인해 24% 가량은 높은 정도(high)의 휘발성을 나타내었다. 환기방식의 경우는 실내에서의 기본적인 환기(indoors - no or basic ventilation)가 약 66%, 실내에서의 좋은 환기

(indoors - good ventilation)가 약 29%의 비율로 두 환기방식이 대다수를 차지하였으며, 일부 실내에서의 향상된 환기(indoors - enhanced ventilation, 4.2%)와 야외(outdoor, 1.7%)가 있었다. 노출시간에서는 ‘15분에서 1시간’과 ‘15분 미만’의 입력값이 각각 63%, 28%로 많았으나, 대부분의 세척작업이 세척 물량에 따라 변이가 크고 간헐적인 작업특성이 있어 해석에 주의가 요구된다. 국소배기장치는 설치·가동(yes)의 경우가 약 76%로, 그렇지 않은 경우(no)의 비율 약 24% 보다 높게 나타났다. 호흡기 보호구의 경우 작업환경측정결과표와 작업환경측정 신뢰성 평가결과 상에서 보호구의 효율과 관련된 정보를 확인할 수 없기 때문에 적절한 보호구를 지급하고 작업 중 양호하게 착용하는 것으로 기재되는 경우 호흡용 보호구 효율 95%를 적용하고 그렇지 않은 경우 호흡용 보호구를 착용하지 않은 것으로 하였다. 그 결과, 호흡용 보호구를 착용하지 않은 경우(66%)가 적정 보호구를 착용한 경우(34%)보다 2배 가량 많게 나타나게 되었다.

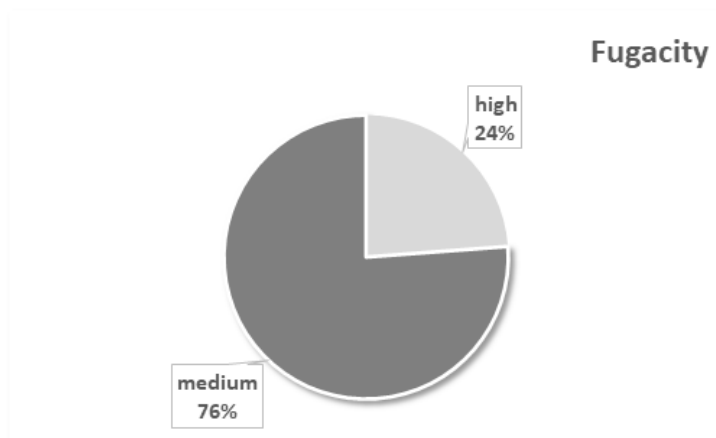
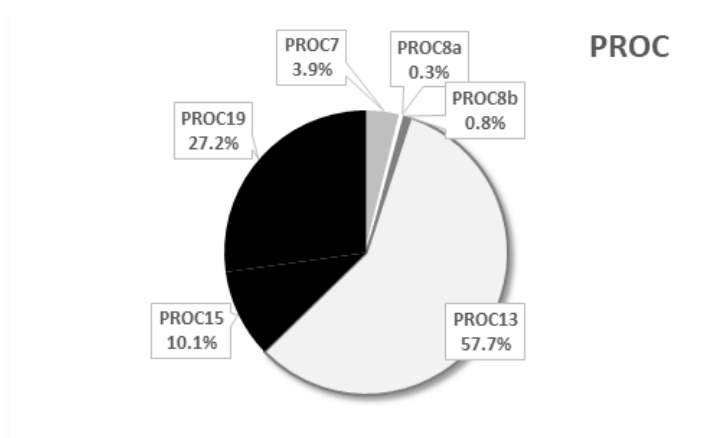
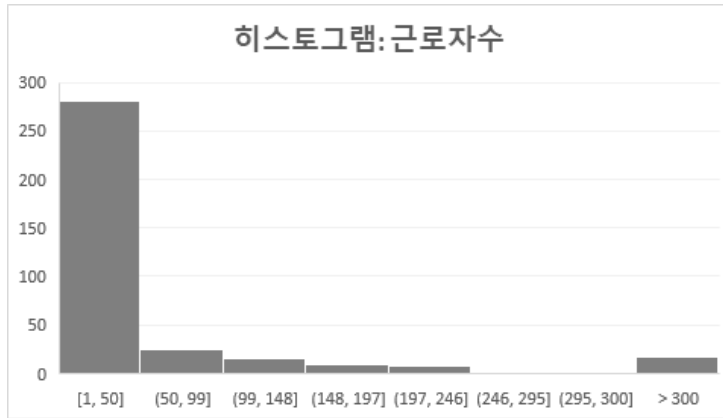
〈표 III-13〉 변수에 따른 추출자료의 일반적 특성

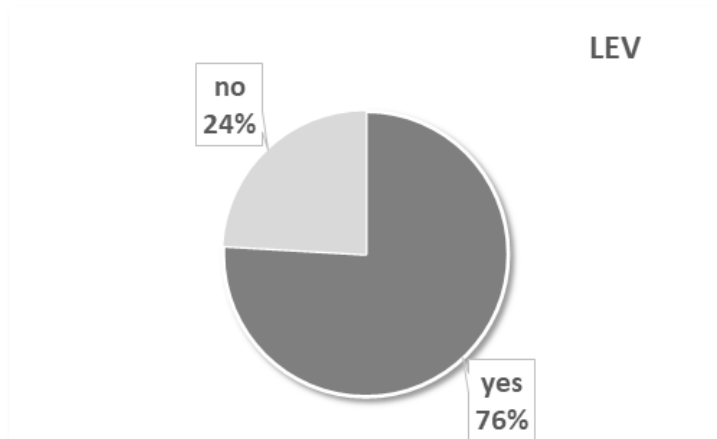
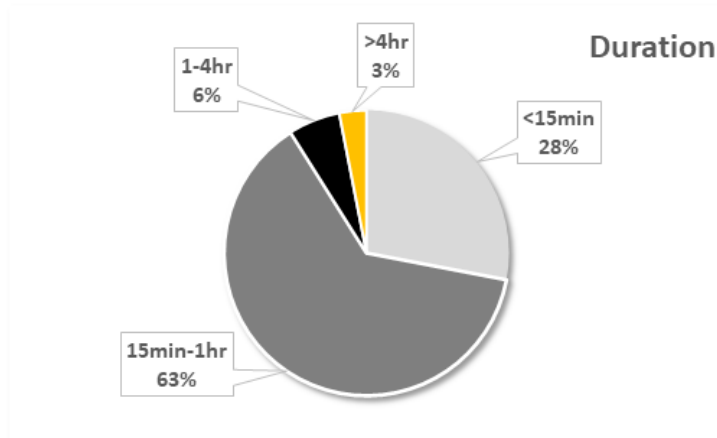
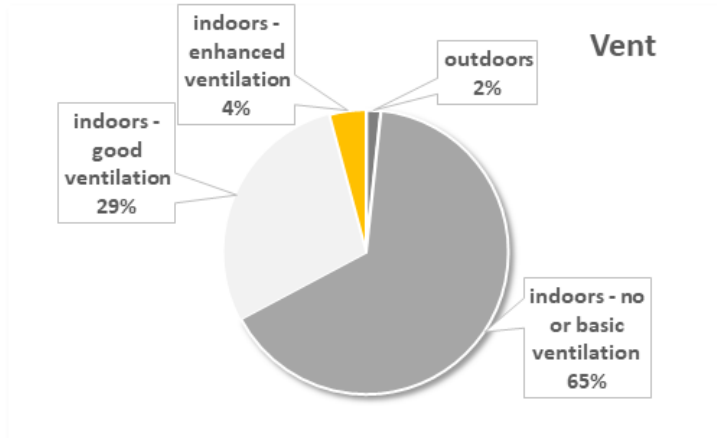
변수	변수값	구성비율(%)
업종	그 외 기타 전자 부품 제조업	12.9
	도금업	10.6
	자동차 종합 수리업	10.4
	그 외 자동차용 신품 부품 제조업	4.2
	인쇄회로기판용 적층판 제조업	3.6
	주형 및 금형 제조업	3.6
	그 외 기타 특수 목적용 기계 제조업	2.2
	완제 의약품 제조업	2.2
	그 외 기타 달리 분류되지 않은 제품 제조업	2.0
	그 외 기타 금속 가공업	2.0
	전자기 측정, 시험 및 분석 기구 제조업	2.0
	기타 반도체 소자 제조업	1.7
	치과용 기기 제조업	1.7
	도장 및 기타 피막 처리업	1.7

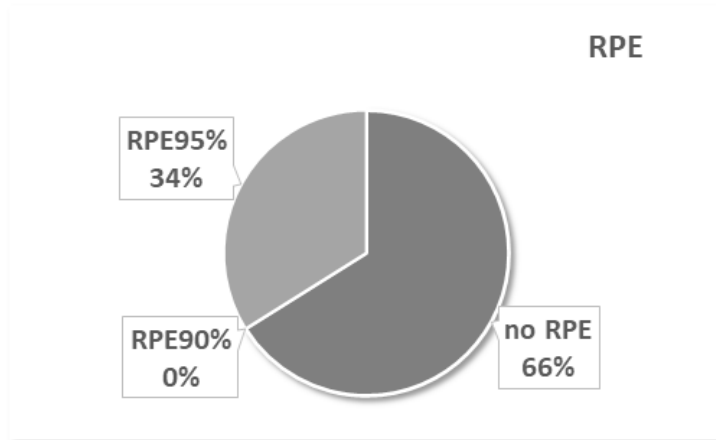
〈표 III-13〉 (계속)

변수	변수값	구성비율(%)
업종	그 외 금속 파스너 및 나사제품 제조업	1.4
	전기회로 개폐, 보호 장치 제조업	1.4
	방송장비 제조업	1.4
	그 외 기타 분류 안된 금속 가공제품 제조업	1.4
	금속 열처리업	1.4
	기타 자연과학 연구개발업	1.1
	절삭 가공 및 유사 처리업	1.1
	기타 전기 변환장치 제조업	1.1
	유선 통신장비 제조업	1.1
	※ 기타 구성비율 1% 미만 업종	27.7
PROC (공정범주)	PROC7	3.9
	PROC8a	0.3
	PROC8b	0.8
	PROC13	57.7
	PROC15	10.1
	PROC19	27.2
증기의 휘발정도 (fugacity)	high	23.8
	medium	76.2
환기방식	outdoors	1.7
	indoors - no or basic ventilation	65.5
	indoors - good ventilation	28.6
	indoors - enhanced ventilation	4.2
노출시간	<15min	28.0
	15min-1hr	63.0
	1-4hr	5.9
	>4hr	3.1
국소배기장치 설치 여부	설치·가동(yes)	75.9
	미설치(no)	24.1
호흡용 보호구	no RPE	66.1
	RPE90%	0.0
	RPE95%	33.9

* 일부 구성비율이 낮은 업종은 표시 생략







[그림 III-9] 추출자료의 노출변수별 특성

3. 노출평가 모델 실행 및 노출 추정값 평가

1) 노출평가 모델 변수값 입력 및 노출 추정치 산출

정리된 자료의 노출변수를 ECETOC TRA 모델의 최신 버전(3.2) 엑셀파일에 입력하여 mg/m^3 단위의 8시간 노출 추정값을 산출하였다.

2) 자료의 적용

앞서 언급한 대로, ECETOC TRA 노출모델의 평가는 최초에 변수와 함께 추출된 4,402의 데이터 중 실제 노출값이 0인 데이터를 제외한 최종 2,295건의 데이터를 사용하여 수행하였으며, 이와 별개로 2,295건의 데이터에서 같은 노출시나리오를 구성하는 데이터로부터 75% 분위수를 각 노출시나리오의 대푯값으로 하여 추가분석하였다. 75% 분위수로 구성된 데이터세트의 데이터 수는 258건이다. 각 시나리오의 75% 분위수 산출 전 데이터의 대수정규분포

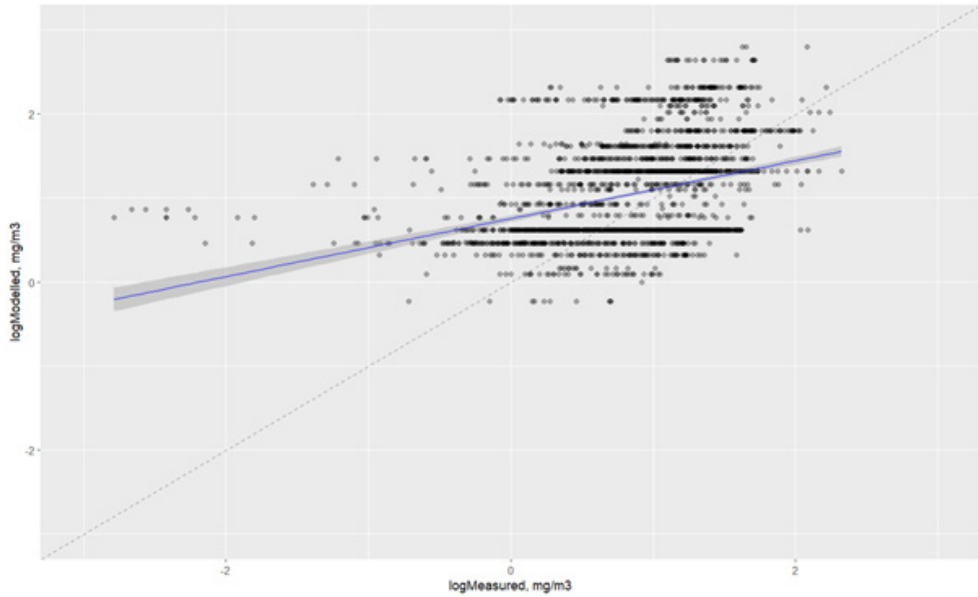
여부를 검증하기 위해 258개의 시나리오 중 데이터 수가 3개 미만으로 정규성 검정 테스트를 실시할 수 없는 시나리오 43개를 제외하고, 각 시나리오 별로 Shapiro-wilk 테스트를 실시한 결과 215개의 노출 시나리오 중 83.7%에 해당하는 180개의 노출 시나리오가 유의수준 0.05 초과로 정규성을 만족하였으며, 나머지 35개의 노출 시나리오는 정규성을 나타내지 않았다.

별도의 언급이 없는 경우 노출모델의 평가에는 실제 노출값과 75% 분위수값, 노출 추정값을 로그변환하여 적용하였다.

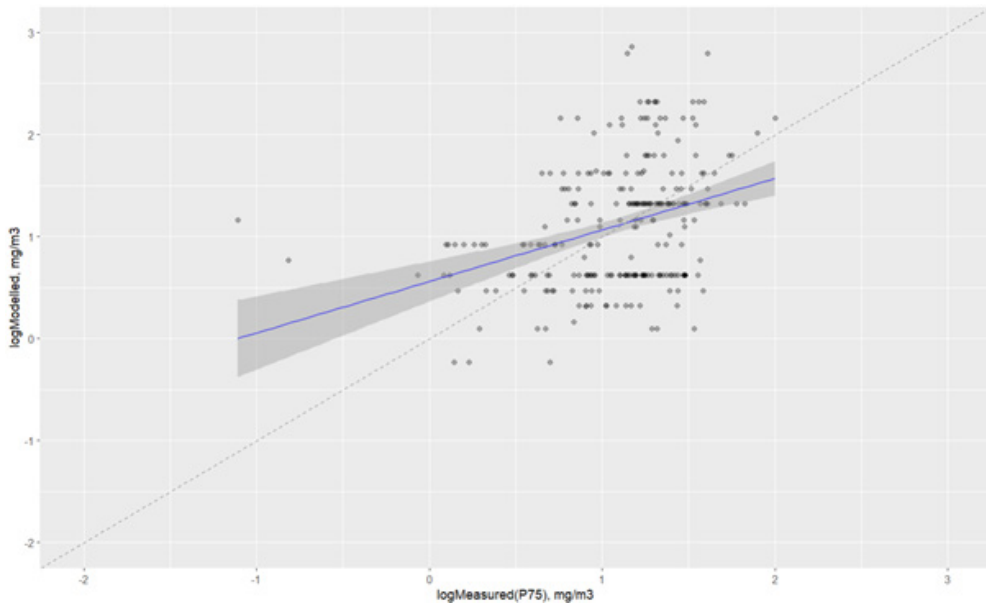
3) 평가 지표별 노출평가 모델 평가

(1) 실제 노출값과 노출 추정값과의 회귀적합

<그림 III-10>과 <그림 III-11>은 로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값과의 관계를 표시한다. 대각선으로 가로지르는 기울기 1인 직선은 실제 노출값의 모든 데이터가 노출 추정값과 일치하는 이상적인 경우로 이 경우 회귀선이 해당 직선과 일치하게 된다. <표 III-14>는 실제 노출값과 노출 추정값을 1차 선형으로 회귀적합한 회귀식의 계수와 결정계수(R^2)를 보여준다. 전체 데이터와 75% 분위수값에 대한 회귀식의 기울기는 각각 0.34와 0.51로 75% 분위수값과 노출 추정값을 회귀적합한 경우의 기울기가 1에 더 가까웠다. 절편의 경우 둘 모두 양수값을 보였는데, 이는 노출 추정값이 실제 데이터값보다 과대평가됨을 의미한다. 결정계수는 전체 데이터를 이용한 경우와 75% 분위수값을 이용한 경우 모두 0.12를 보였다.



[그림 Ⅲ-10] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%)



[그림 Ⅲ-11] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터)

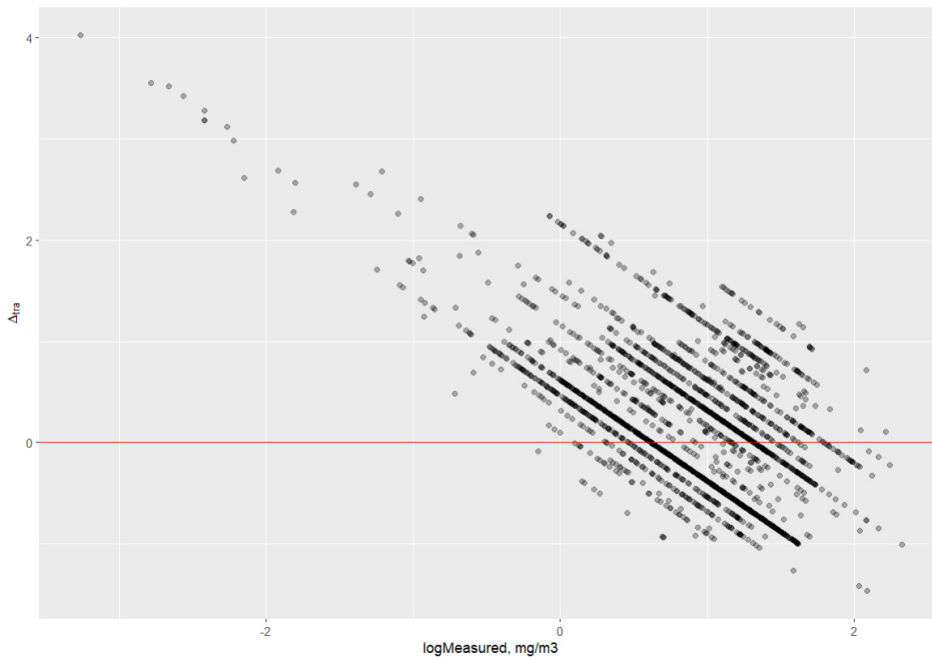
〈표 III-14〉 실제 노출값과 노출 추정값을 적합한 회귀식의 계수 및 결정계수

	절편	기울기	조정 결정계수(Adjusted R ²)
전체 데이터	0.76	0.34	0.12
P75 데이터	0.56	0.51	0.12

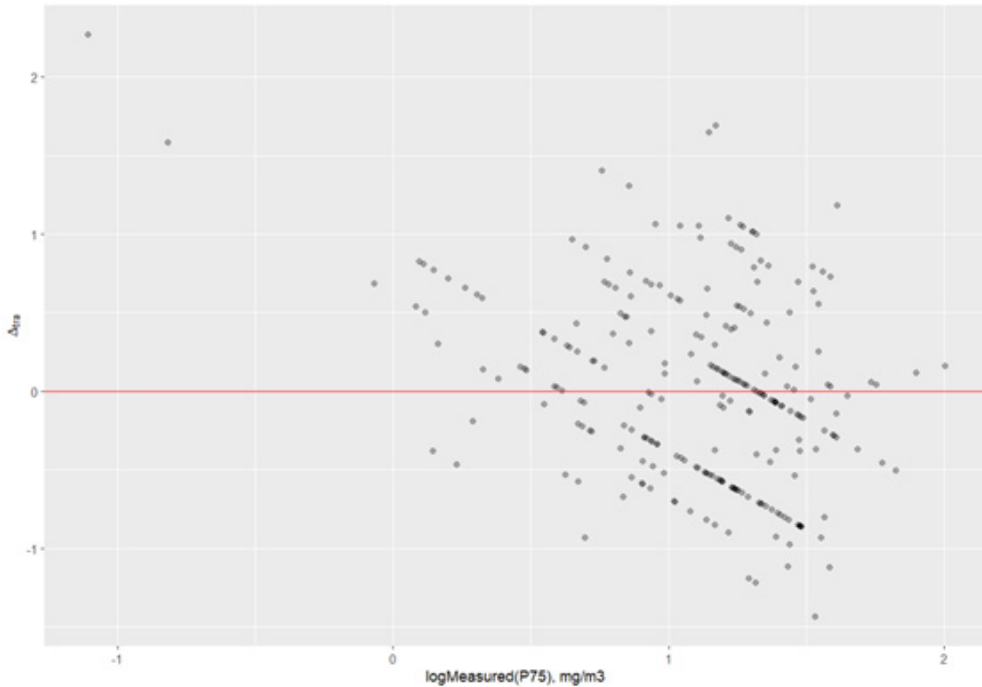
(2) 노출모델의 과대/과소 추정 경향성 (conservatism, 보수성) 평가

가) 노출 추정값과 실제 노출값과의 차이 분석

우선 노출모델의 과소 또는 과대 추정의 경향성을 살펴보기 위해, 로그변환된 노출 추정값과 로그변환된 실제 노출값의 차이로 정의되는 Δ_{TRA} 를 시각적으로 분석하였다. 〈그림 III-12〉, 〈그림 III-13〉에서 보는 바와 같이 데이터와 무관하게 실제 노출값이 작은 경우 과대로, 실제 노출값이 큰 경우 과소로 추정하는 경향성을 확인하였다.



[그림 III-12] 각각 로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값의 차이(x축은 실제 노출값)



[그림 III-13] 각각 로그변환된 실제 노출값과 노출 추정값의 차이(x축은 실제 노출값, 75% 분위수 데이터)

이어서 노출모델의 과소 또는 과대 추정의 경향성을 추가로 살펴보기 위해 노출 추정값이 실제 노출값보다 몇 배 큰지에 따라 구간별로 나누어 분석하였으며, 이와 함께 정량적인 지표로 MAE를 산출하여 <표 III-15>에 표시하였다. MAE의 산출에는 실제값, 추정값 모두 로그변환된 값을 대상으로 하였다.

전체 데이터를 이용한 경우, 58.3%의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값보다 큰 과대평가이었으며, 41.7%의 데이터가 과소평가이었다. 과대평가 데이터 중 대부분이 노출 추정값이 실제 노출값의 1~5배 수준이었다. 노출 추정값이 실제 노출값보다 작은 과소평가 자료 중 대부분의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5~1배 수준이었다. 노출 추정값과 실제 노출값이 극단적으로 차이나는 경우는 1/100~1/10배 수준 0.3%, 100배 이상 1.4%로 그 수는 많지 않았다.

75% 분위수 데이터를 이용한 경우도 유사하게 나타났다. 전체 데이터의 경우보다 작은 48.8%의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값보다 큰 과대평가 이었으며, 과대평가 데이터의 대부분이 노출 추정값이 실제 노출값의 1~5배 수준이었다. 과소평가도 마찬가지로 노출 추정값이 실제 노출값보다 작은 과소평가 자료 중 대부분의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5~1배 수준이었다. 75% 분위수 데이터에서 노출 추정값과 실제 노출값이 극단적으로 차이 나는 경우는 1/100~1/10배 수준 1.9%, 100배 이상 0.4%로 그 수는 역시 많지 않았다.

전체 데이터를 이용한 경우와 75% 분위수 데이터를 이용한 경우 모두 MAE는 1보다 작은 0.46을 보였는데, 이는 평균적으로 노출 추정값이 실제 노출값보다 10^{0.46} 또는 2.88배 떨어져있음을 의미한다.

〈표 III-15〉 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수 및 MAE

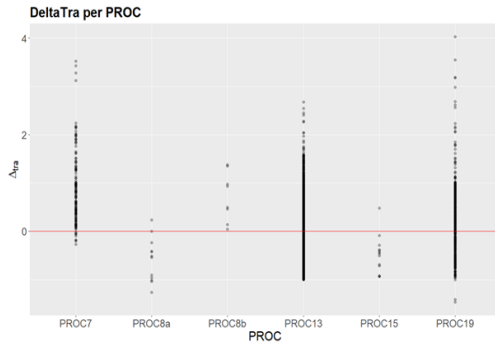
	실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수							MAE
	1/100~ 1/10배	1/10~1 /5배	1/5~1배	1~5배	5~10배	10~ 100배	100배 이상	
전체 데이터	7	200	750	842	292	171	33	0.46
	0.3%	8.7%	32.7%	36.7%	12.7%	7.5%	1.4%	
P75 데이터	5	27	100	91	20	14	1	0.46
	1.9%	10.5%	38.8%	35.3%	7.8%	5.4%	0.4%	

Delta_{TRA}에 평균과 표준편차를 적용한 결과, 전체 데이터를 이용한 경우는 0.19 ± 0.68 , 75% 분위수 데이터를 이용한 경우 0.01 ± 0.61 로 둘 모두 과대 평가 경향을 보였으며 편차는 유사한 반면, 75% 분위수 데이터를 이용한 경우가 전체 데이터를 이용한 경우보다 실제 노출값과의 차이가 작았다.

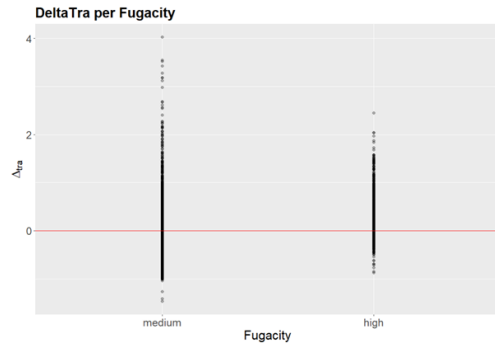
나) 노출변수별 노출 추정 경향성 기여도 분석

우선 전체 데이터를 이용한 분석결과(<그림 III-14>), PROC(공정범주)에 대하여는 조사된 PROC 중 PROC7(산업적 스프레이 작업)과 PROC8b(고정형 저장시설에 저장 또는 저장시설로부터 이송, 운반)를 제외한 PROC8a(지정된 노출저감 시설이 적용되지 않는 상황에서의 물질 및 혼합물 이송(채우거나 비우는 과정)), PROC13(담그거나, 들이부어 완제품 처리), PROC15(소규모 연구소에 실험실 시약으로 사용), PROC19(손과 팔뚝 노출이 있는 수작업 활동)에서 과소평가 경향을 보였다. 높은 과소평가 경향성은 증기의 휘발정도(fugacity) 중 '중간 휘발' 정도가 '높은 휘발' 정도보다 높았으며, 환기에 따른 경향성과 관련해서는 '야외'를 제외하고 모든 환기방식에서 다소간의 과소평가 경향성을 보였다. 노출시간의 경우 '15분에서 1시간'의 작업시간이 다른 작업 시간 범주보다 상대적으로 과소평가 경향이 높았다. 혼합물 내 농도에 따른 경향은 '25% 초과' 농도의 데이터 수가 압도적으로 많아 해당 농도에서의 경향성은 다양하다고 할 수 있으나, '1-5%' 농도범주에서는 과소평가 경향이 두드러지게 높았다. 국소배기장치 설치·가동 여부에 대해서는, '국소배기장치 설치·가동'의 경우 그렇지 않은 경우보다 넓은 범위에 걸쳐 있으며 과소평가 경향도 상대적으로 더 높았다.

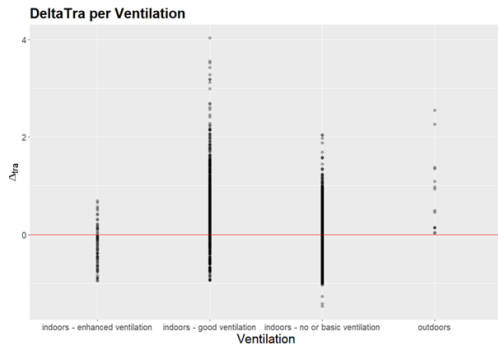
75% 분위수 데이터를 이용한 경우도 유사한 결과(<그림 III-15>)를 보였다.



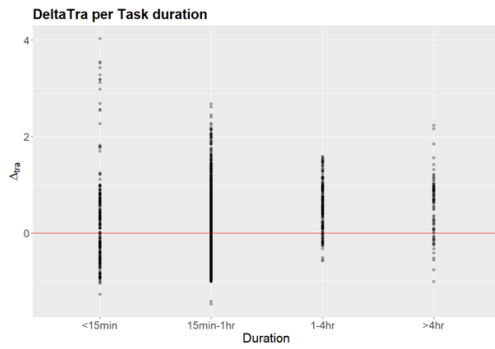
〈 공정범주(PROC) 〉



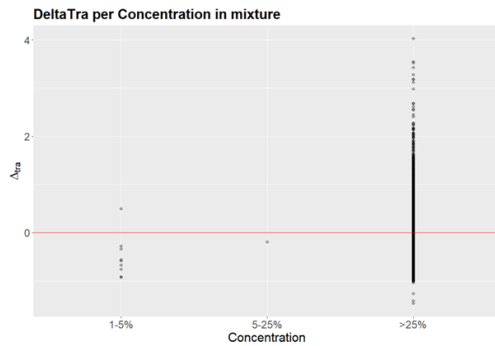
〈 휘발정도 〉



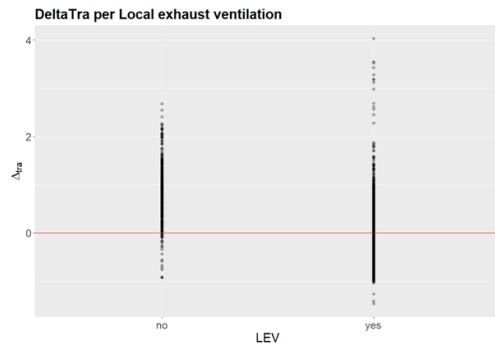
〈 환기방식 〉



〈 노출시간 〉

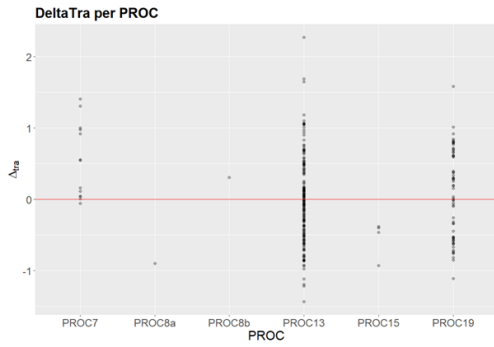


〈 혼합물 내 농도 〉

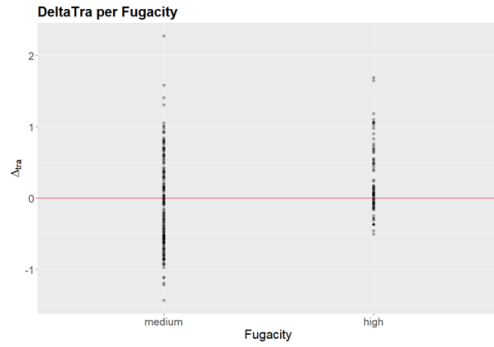


〈 국소배기장치 설치가동 〉

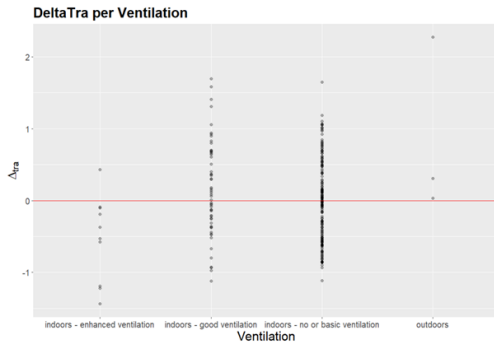
[그림 III-14] 노출변수별 Δ_{TRA}



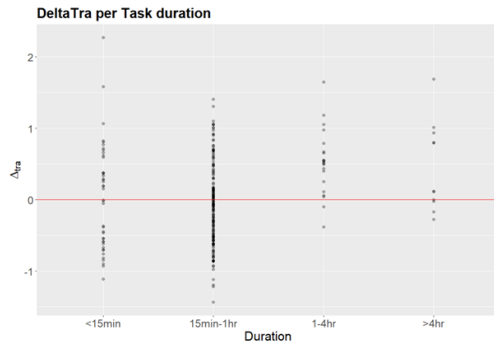
〈 공정범주(PROC) 〉



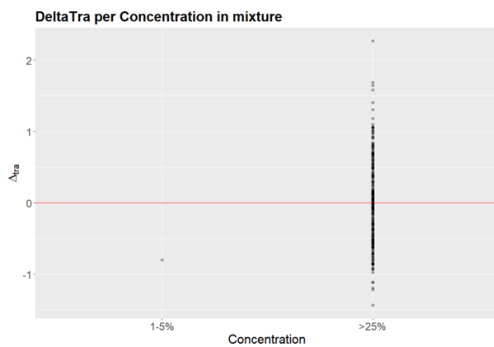
〈 휘발정도 〉



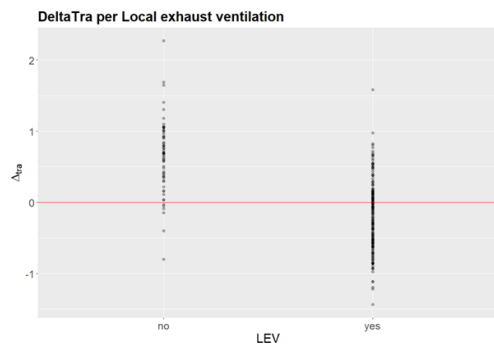
〈 환기방식 〉



〈 노출시간 〉



〈 혼합물 내 농도 〉



〈 국소배기장치 설치·가동 〉

[그림 III-15] 노출변수별 Δ_{TRA} (75% 분위수 데이터)

다) 다중 회귀분석

각 변수에 대해 노출 추정값의 과대/과소 추정 경향성을 정량적으로 살펴 보기 위해 Δ_{TRA} 를 종속변수로 하고 노출변수를 독립변수로 하여 다중 회귀분석을 실시하여 결과는 <표 III-16>과 <표 III-17>에 요약하여 제시하였다.

각 변수에서 통계적으로 유의하면서 음의 값의 계수를 가지는 입력값은 다음과 같다.

- PROC(공정범주) : PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19
- 국소배기 설치·가동 여부(yes/no) : 국소배기 설치·가동(yes)
- 노출시간 : 15분에서 1시간

음의 값의 계수를 가진다는 것은 이들 입력값은 입력하여 노출값을 추정하게 되면 과소평가 되기 쉽다는 것을 의미한다.

<표 III-16> Δ_{TRA} 에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(전체 데이터)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	-0.26021	0.19648	-1.324	0.185512
PROC	PROC8a	-1.17543	0.16036	-7.33	3.18E-13 ***
	PROC8b	-0.73011	0.28237	-2.586	0.009782 **
	PROC13	-0.53391	0.04504	-11.854	<2.00E-16 ***
	PROC15	-1.43488	0.15232	-9.42	<2.00E-16 ***
	PROC19	-0.42161	0.05068	-8.318	<2.00E-16 ***
LEV	yes	-0.65521	0.0303	-21.621	<2.00E-16 ***
Fugacity	high	0.34478	0.02649	13.017	<2.00E-16 ***
Ventilation	indoors - good ventilation	0.58663	0.06603	8.884	<2.00E-16 ***
	indoors - no or basic ventilation	0.21775	0.06289	3.462	0.000545 ***
	outdoors	0.72717	0.22213	3.274	0.001078 **
Duration	15min~1hr	-0.29687	0.04188	-7.089	1.79E-12 ***
	1~4hr	-0.04611	0.05571	-0.828	0.407947
	>4hr	0.08768	0.06775	1.294	0.195788
Concentration	5~25%	1.08784	0.54619	1.992	0.046524 *
	>25%	1.28224	0.17478	7.336	3.03E-13 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'

동일한 분석을 75% 분위수 데이터를 이용하여 실시한 결과는 <표 III-17>에 제시하였다. 각 변수에서 통계적으로 유의하면서 음의 값의 계수를 가지는 입력값은 전체 데이터를 이용하여 분석한 결과와 동일한 양상을 보였다.

<표 III-17> Delta_{TRA}에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(75% 분위수 데이터)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	-0.34151	0.42909	-0.796	0.426869
PROC	PROC8a	-1.2338	0.40159	-3.072	0.002366**
	PROC8b	-1.21588	0.47851	-2.541	0.011678*
	PROC13	-0.51987	0.11089	-4.688	4.59E-06***
	PROC15	-1.03225	0.22672	-4.553	8.37E-06***
	PROC19	-0.3169	0.12396	-2.556	0.011182*
LEV	yes	-0.87657	0.0598	-14.657	<2.00E-16***
Fugacity	high	0.44	0.05741	7.664	4.30E-13***
Ventilation	indoors - good ventilation	0.3604	0.13262	2.717	0.007053**
	indoors - no or basic ventilation	0.34785	0.12453	2.793	0.005633**
	outdoors	0.95821	0.30253	3.167	0.001736**
Duration	15min~1hr	-0.29896	0.0796	-3.756	0.000216***
	1~4hr	0.11066	0.11467	0.965	0.33549
	>4hr	0.10275	0.13599	0.756	0.450631
Concentration	>25%	1.20522	0.38506	3.13	0.001962**

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'

(3) 별도의 노출량 추정모델 생성을 위한 다중 회귀분석

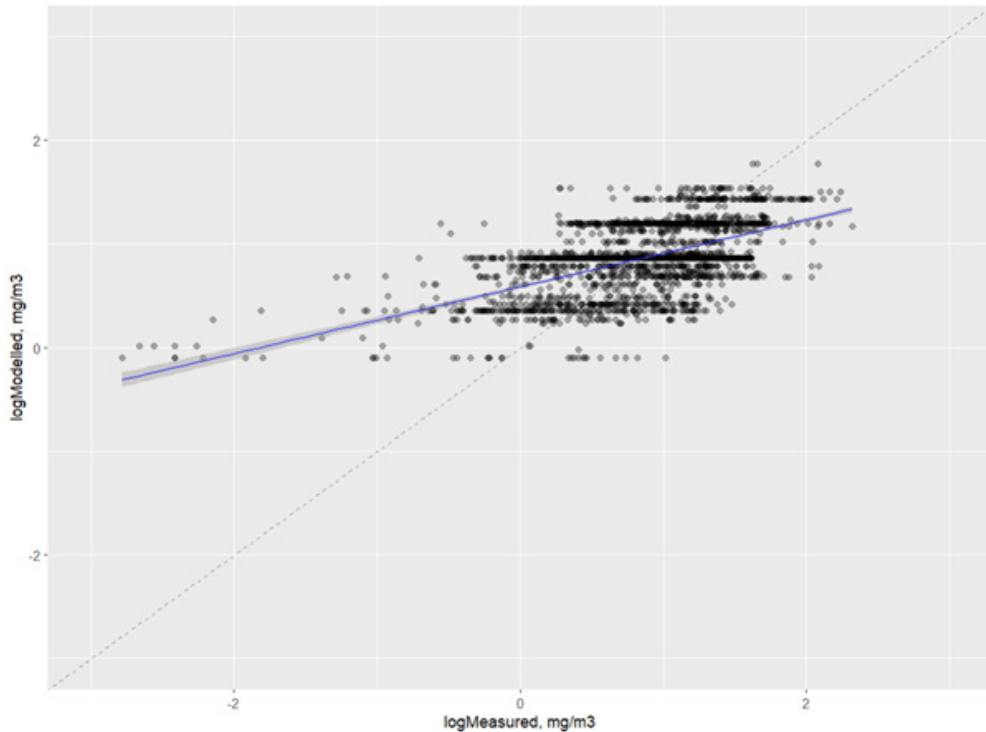
가) 전체 데이터에 ECETOC TRA 변수 적용

전체 데이터에 ECETOC TRA의 노출변수를 독립변수로 적용한 회귀분석의 결과는 <표 III-18>에 요약하여 제시하였으며, 로그변환한 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도는 <그림 III-16>과 같다. 전체 데이터를 이용하여 다중 회귀 분석한 결과 조정 결정계수(R²)는 0.32로 회귀식은 노출 데이터 변동의 32% 가량을 설명하였다.

<표 III-18> 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(전체 데이터, ECETOC TRA 변수)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	1.1461	0.1887	6.0730	1.46e-09***
PROC	PROC8a	0.3758	0.1540	2.4400	0.014753*
	PROC8b	-0.0621	0.2712	-0.2290	0.81894
	PROC13	-0.0378	0.0433	-0.8740	0.382443
	PROC15	0.2152	0.1463	1.4710	0.141423
	PROC19	-0.1196	0.0487	-2.4570	0.014068*
Fugacity	high	0.3284	0.0254	12.9080	<2e-16***
Ventilation	indoors - good ventilation	-0.2095	0.0634	-3.3040	0.000969***
	indoors - no or basic ventilation	0.3064	0.0604	5.0730	4.23e-07***
	outdoors	-0.4352	0.2133	-2.0400	0.041489*
Duration	15min-1hr	0.3715	0.0402	9.2380	<2e-16***
	1-4hr	0.6053	0.0535	11.3120	<2e-16***
	>4hr	0.6772	0.0651	10.4060	<2e-16***
Concentration	5-25%	-0.6151	0.5246	-1.1720	0.241126
	>25%	-0.5787	0.1679	-3.4480	0.000576***
LEV	yes	-0.3400	0.0291	-11.6820	<2e-16***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



[그림 Ⅲ-16] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%)

나) 전체 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가변수 적용

전체 데이터를 이용하여 ECETOC TRA 노출모델의 노출변수 중 이용 가능한 변수인 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출 시간, 함유량, 국소배기장치 설치·가동(yes/no) 등 6개 변수에 더해 지역, 사업장 규모를 추가 독립변수로 하여 다중 회귀분석한 결과를 <표 Ⅲ-19>에 요약하여 제시하였으며, 로그변환한 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도는 <그림 Ⅲ-17>과 같다. 조정 결정계수(R^2) 0.36은 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량 등 6개 변수만을 적용한 결과의 조정 결정계수보다는 다소 높았다.

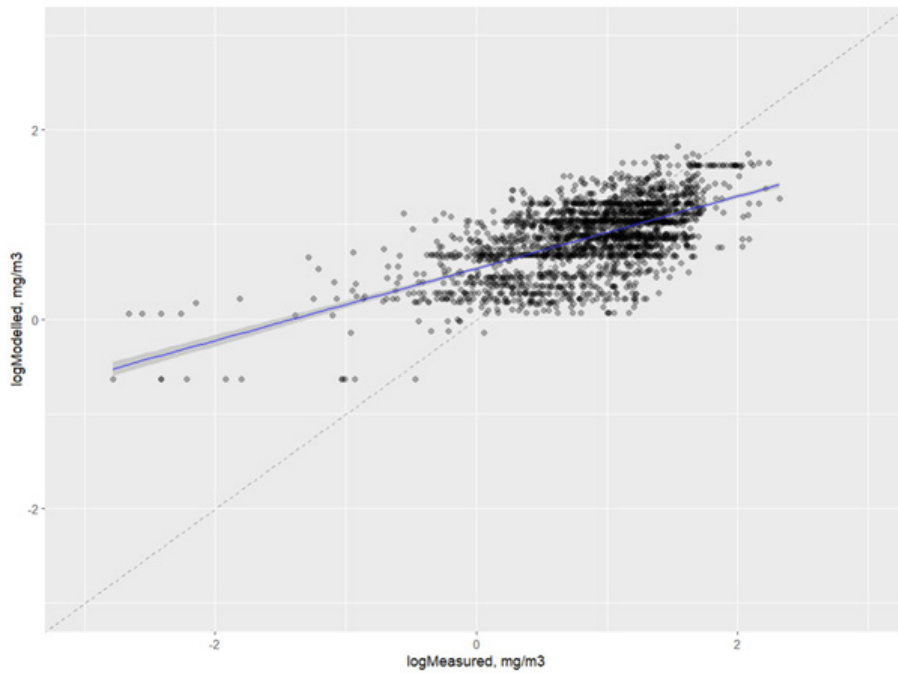
〈표 III-19〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석 요약(전체 데이터, ECETOC TRA 및 추가 변수)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	1.0042	0.1924	5.2200	1.96e-07***
PROC	PROC8a	0.1314	0.1601	0.8210	0.411897
	PROC8b	-0.1668	0.2749	-0.6070	0.544041
	PROC13	-0.0104	0.0488	-0.2130	0.831229
	PROC15	0.3339	0.1459	2.2880	0.022257*
	PROC19	-0.0472	0.0540	-0.8750	0.381518
Fugacity	high	0.3744	0.0272	13.7420	<2e-16***
Ventilation	indoors - good ventilation	-0.2661	0.0632	-4.2120	2.63e-05***
	indoors - no or basic ventilation	0.1970	0.0602	3.2730	0.001079**
	outdoors	-0.4461	0.2069	-2.1560	0.031209*
Duration	15min-1hr	0.3703	0.0428	8.6480	<2e-16***
	1-4hr	0.5802	0.0551	10.5280	<2e-16***
	>4hr	0.6231	0.0689	9.0380	<2e-16***
Concentration	5-25%	-0.4653	0.5190	-0.8970	0.370031
	>25%	-0.3947	0.1652	-2.3890	0.016960*
LEV	yes	-0.3154	0.0303	-10.4180	<2e-16***
Area (MOEL)	고양	-0.0971	0.1013	-0.9590	0.337806
	광주청	0.9986	0.2526	3.9540	7.93e-05***
	구미	0.1933	0.0576	3.3580	0.000798***
	대구서부	0.1029	0.1200	0.8580	0.391105
	대구청	0.2721	0.1887	1.4420	0.149429
	대전청	0.0330	0.0572	0.5760	0.564627
	부산동부	0.2293	0.0828	2.7690	0.005668**
	부산북부	-0.2899	0.0960	-3.0210	0.002548**
	부산청	0.0635	0.0954	0.6660	0.505371
	부천	0.1722	0.0520	3.3090	0.000952***
	서산	0.2826	0.4794	0.5890	0.555667
	서울관악	0.0255	0.1146	0.2220	0.824006

〈표 III-19〉 (계속)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
Area (MOEL)	서울남부	0.2373	0.1675	1.4160	0.156861
	서울동부	0.0997	0.1987	0.5020	0.615842
	서울서부	0.5013	0.3433	1.4600	0.144398
	서울청	0.1886	0.1987	0.9490	0.342706
	성남	-0.3180	0.0922	-3.4500	0.000571***
	안산	-0.0055	0.0557	-0.0990	0.921268
	안양	-0.1745	0.0446	-3.9130	9.37e-05***
	양산	0.0464	0.0629	0.7380	0.460629
	울산	0.1532	0.2239	0.6840	0.493925
	원주	-0.2138	0.2024	-1.0560	0.29092
	의정부	0.2890	0.0684	4.2280	2.46e-05***
	인천북부	-0.1086	0.0462	-2.3510	0.018816*
	전주	-0.2343	0.1988	-1.1790	0.238716
	중부청	0.0013	0.0586	0.0210	0.982928
	창원	0.0765	0.1179	0.6490	0.516372
	천안	-0.0841	0.0805	-1.0440	0.296432
	청주	0.0040	0.0811	0.0490	0.960994
	충주	0.5369	0.2805	1.9140	0.055740.
평택	-0.0724	0.1084	-0.6680	0.504335	
Workplace size (no of workers)	50인 이상 300인 미만	-0.0019	0.0332	-0.0570	0.95476
	300인 이상	-0.2947	0.0746	-3.9500	8.07e-05***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



[그림 III-17] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 변수 추가)

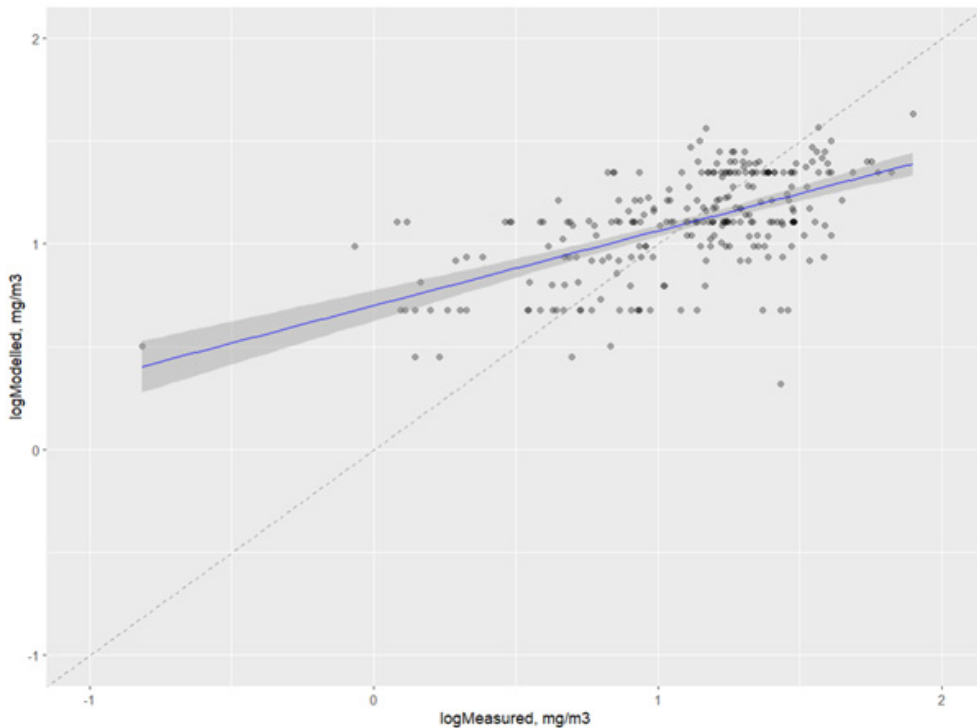
다) 75% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수

75% 분위수 데이터에 ECETOC TRA의 노출변수를 독립변수로 적용한 회귀분석의 결과는 <표 III-20>에 요약하여 제시하였으며, 로그변환한 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도는 <그림 III-18>과 같다. 조정 결정계수(R^2)는 0.34였다.

〈표 III-20〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(75% 분위수 데이터, ECETOC TRA 변수)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	1.3109	0.3852	3.4030	0.000779***
PROC	PROC8a	0.3503	0.3605	0.9720	0.332115
	PROC8b	0.4693	0.4296	1.0920	0.275716
	PROC13	-0.0705	0.0995	-0.7080	0.479658
	PROC15	-0.2437	0.2035	-1.1970	0.232279
	PROC19	-0.1912	0.1113	-1.7190	0.086973.
Fugacity	high	0.2386	0.0515	4.6290	6.00e-06***
Ventilation	indoors - good ventilation	0.0150	0.1191	0.1260	0.899926
	indoors - no or basic ventilation	0.1872	0.1118	1.6740	0.095347.
	outdoors	-0.7074	0.2716	-2.6050	0.009758**
Duration	15min-1hr	0.3105	0.0715	4.3450	2.05e-05***
	1-4hr	0.3630	0.1029	3.5260	0.000504***
	>4hr	0.5954	0.1221	4.8770	1.95e-06***
Concentration	>25%	-0.5264	0.3457	-1.5230	0.12909
LEV	yes	-0.1044	0.0537	-1.9450	0.052921

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



[그림 III-18] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터)

라) 75% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가변수 적용

75% 분위수 데이터를 이용하여 ECETOC TRA 노출모델의 노출변수 중 이용 가능한 변수인 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량, 국소배기장치 설치·가동(yes/no) 등 6개 변수에 더해 지역, 사업장 규모를 추가 독립변수로 하여 다중 회귀분석한 결과를 <표 III-21>에 요약하여 제시하였으며, 로그변환한 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도는 <그림 III-19>와 같다. 조정 결정계수(R^2) 0.33은 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량 등 6개 변수만을 적용한 결과의 조정 결정계수와 유사하였다.

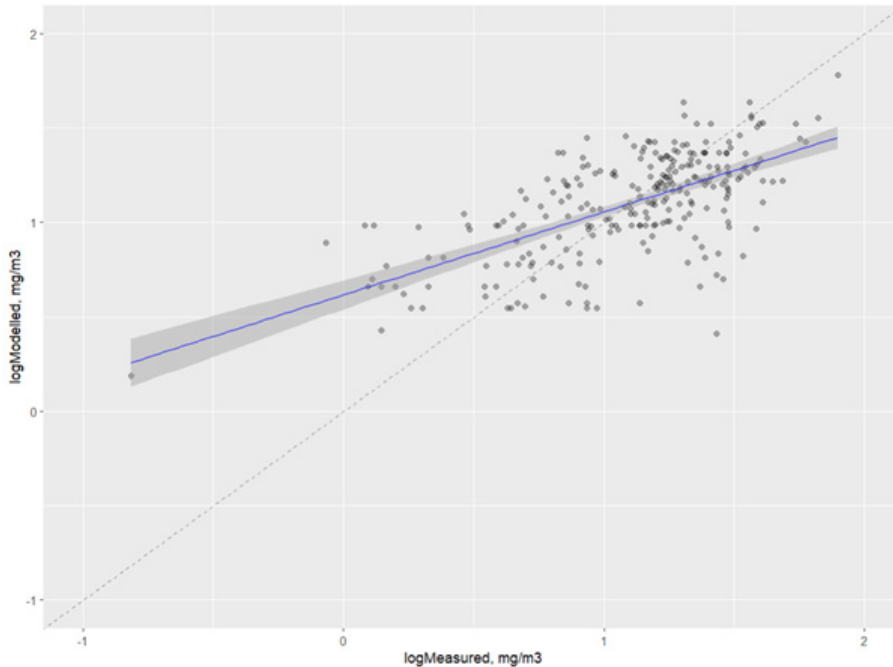
〈표 III-21〉 실제 노출값에 대한 다중선형 회귀분석의 계수 요약(75% 분위수 데이터, ECETOC TRA 및 추가 변수)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
	(Intercept)	1.1152	0.4078	2.7350	0.006765**
PROC	PROC8a	0.1670	0.3885	0.4300	0.667706
	PROC8b	0.3978	0.4715	0.8440	0.399802
	PROC13	-0.0692	0.1119	-0.6180	0.537012
	PROC15	-0.1318	0.2222	-0.5930	0.55365
	PROC19	-0.1379	0.1253	-1.1000	0.272469
Fugacity	high	0.2591	0.0576	4.4990	1.12e-05***
Ventilation	indoors - good ventilation	-0.0085	0.1224	-0.0700	0.944509
	indoors - no or basic ventilation	0.1385	0.1153	1.2020	0.230779
	outdoors	-0.6440	0.2770	-2.3250	0.021026*
Duration	15min-1hr	0.3450	0.0798	4.3260	2.33e-05***
	1-4hr	0.4192	0.1125	3.7260	0.000249***
	>4hr	0.5729	0.1392	4.1150	5.53e-05***
Concentration	>25%	-0.3370	0.3568	-0.9450	0.34587
LEV	yes	-0.0805	0.0576	-1.3970	0.163799
Area (MOEL)	고양	-0.0917	0.1914	-0.4790	0.632239
	구미	0.0765	0.1694	0.4510	0.652113
	대구서부	-0.0628	0.2113		-0.297
	대구청	0.2520	0.3574	0.7050	0.481527
	대전청	0.0235	0.1232	0.1910	0.84891
	부산동부	0.0546	0.1742	0.3130	0.754354
	부산북부	0.0240	0.1850	0.1300	0.896703
	부산청	-0.0202	0.1865	-0.1090	0.913684
	부천	0.1833	0.1071	1.7120	0.088380.
	서울관악	0.1947	0.2099	0.9280	0.354577

〈표 III-21〉 (계속)

입력변수	구분	계수	표준 에러	t값	Pr(> t)
Area (MOEL)	서울남부	0.0889	0.2695	0.3300	0.741754
	서울동부	-0.0114	0.3506	-0.0330	0.974011
	서울청	0.1272	0.3506	0.3630	0.717032
	성남	-0.1725	0.1767	-0.9760	0.32993
	안산	0.0555	0.1116	0.4970	0.619552
	안양	-0.1276	0.0836	-1.5260	0.128498
	양산	-0.1084	0.1293	-0.8390	0.402526
	울산	0.0231	0.3682	0.0630	0.94997
	원주	-0.1183	0.3584	-0.3300	0.741726
	의정부	0.1524	0.1415	1.0770	0.282684
	인천북부	-0.1514	0.0862	-1.7570	0.080368.
	전주	-0.0382	0.3503	-0.1090	0.91328
	중부청	-0.0378	0.1056	-0.3580	0.72048
	창원	-0.0999	0.2273	-0.4390	0.660934
	천안	0.0020	0.1873	0.0110	0.991548
	청주	0.1116	0.1735	0.6430	0.520845
	충주	0.3812	0.3542	1.0760	0.283056
평택	-0.0020	0.1682	-0.0120	0.990594	
Workplace size (no of workers)	50인 이상 300인 미만	0.0620	0.0768	0.8080	0.420261
	300인 이상	-0.1923	0.1796	-1.0710	0.28553

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'



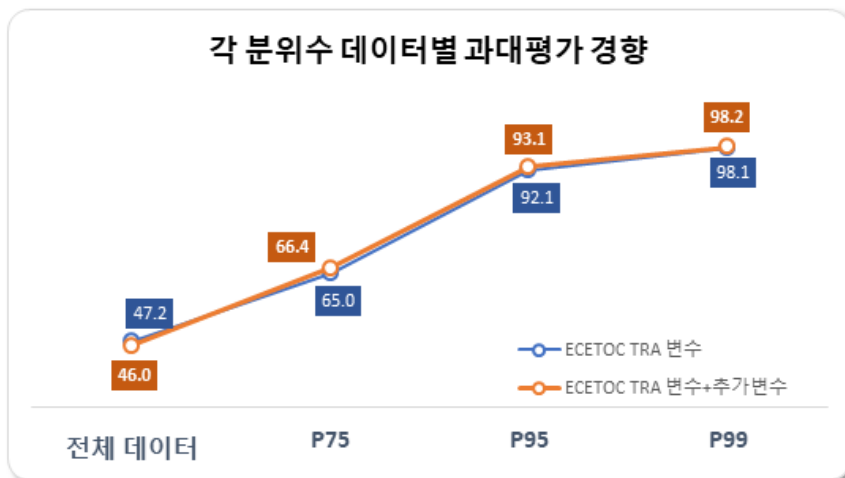
[그림 III-19] 실제 노출값과 노출 추정값의 산포도 및 회귀식(보라색 음영 : 신뢰구간 95%, 75% 분위수 데이터, 변수 추가)

실제 노출값에 대한 각 회귀식으로부터 추정된 노출 추정값의 배수를 구간 별로 나누어 분석한 결과는 <표 III-22>에 제시하였다. 이 때, 분위수 데이터 적용에 따른 추정값의 보수적인 경향성을 확인하기 위하여 95%와 99% 분위수 데이터로 회귀적합한 결과와 실제 노출값을 비교한 결과를 추가하여 제시하였다. 참고로 75%, 95%, 99% 분위수 데이터를 이용하여 실제 노출값과 비교하는 때에, 각 노출시나리오 별로 데이터수가 부족하여 각 분위수 데이터를 산출할 수 없는 경우가 제외되어 2,295건이 아닌 2,246건의 데이터가 비교되었다.

- 1) 전체 데이터에 ECETOC TRA 변수를 적용한 경우는, 47.2%가 과대평가 되었으며, 87.2%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다.
- 2) 전체 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가변수를 적용한 경우는, 46.0%가 과대평가 되었으며, 88.8%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에

분포하였다. 3) 75% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수를 적용한 경우는, 65.0%가 과대평가 되었으며, 79.7%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다. 4) 75% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가 변수를 적용한 경우는, 66.4%가 과대평가 되었으며, 79.4%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다.

추가로 분석한 95%, 99% 분위수 데이터를 이용한 경우, 5) 95% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수를 적용한 경우는, 92.1%가 과대평가 되었으며, 58.9%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다. 6) 95% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가변수를 적용한 경우는 93.1%가 과대평가 되었으며, 57.2%의 노출 추정값이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다. 7) 99% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수를 적용한 경우는, 98.1%가 과대평가 되었으며, 35.3%의 노출 추정값만이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다. 8) 99% 분위수 데이터에 ECETOC TRA 변수 및 추가 변수를 적용한 경우는 98.2%가 과대평가 되었으며, 34.8%의 노출 추정값만이 실제 노출값의 1/5 ~ 5배에 분포하였다.



[그림 III-20] 각 분위수 데이터별 과대평가 경향

〈표 III-22〉 실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수

		실제 노출값 대비 노출 추정값의 배수							
		1/100배 미만	1/100~ 1/10배	1/10~ 1/5배	1/5~1배	1~5배	5~10배	10~ 100배	100배 이상
전체 데이터	-	-	11	106	1,094	907	121	45	11
	-	-	0.5%	4.6%	47.7%	39.5%	5.3%	2%	0.5%
추가 변수	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	16	88	1,134	905	96	47	8
P75 데이터	-	-	4	30	751	1040	227	175	19
	-	-	0.2%	1.3%	33.4%	46.3%	10.1%	7.8%	0.8%
추가 변수	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	3	30	721	1063	242	167	20
P95 데이터	-	-	2	2	173	1149	403	474	43
	-	-	0.1%	0.1%	7.7%	51.2%	17.9%	21.1%	1.9%
추가 변수	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	1	3	150	1134	399	515	44
P99 데이터	-	-	-	4	38	755	561	805	83
	-	-	-	0.2%	1.7%	33.6%	25.0%	35.8%	3.7%
추가 변수	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	3	37	745	505	858	98
추가 변수	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0.1%	1.6%	33.2%	22.5%	38.2%	4.4%

IV. 고찰 및 결론



IV. 고찰 및 결론

1. 고찰

노출량을 추정하는 노출모델은 자주 그 신뢰성을 의심받고 있어 실제 노출 데이터를 통한 검증이 요구되며, 실제로 많은 연구(Kupczewska-Dobecka et al., 2011; Mc Donnell et al., 2011; Ishii et al., 2017; Savic et al., 2017, 2019, 2023; van Tongeren et al., 2017; Lee et al., 2019)에서 실제 노출값과 그와 관련된 노출변수로부터 추정된 노출값을 비교함으로써 노출모델을 검증하고 있다. 또한 Fransman(2017)과 van Tongeren 등 (2017)은 사업장, 산업, 국가에 따른 작업환경의 노출특성을 고려하여 다양한 환경의 노출 시나리오에서 얻은 데이터로부터 모델을 검증하는 것이 필요하다고 하였다. 이에 이번 연구에서 국내의 작업환경측정결과 데이터를 이용하여 ECETOC TRA 노출모델을 평가하였다.

연구결과 ECETOC TRA 모델에 대한 실제 노출값과 노출 추정값의 일치 정도는 크지 않았다. 수집된 전체 데이터와 75% 분위수값을 이용한 경우 모두 0.12의 조정 결정계수(R^2)를 보였다. 이전 연구를 살펴보면 본 연구의 결과보다는 높은 하지만 Savic 등이 2023년에 ECETOC TRA 버전3을 실제 데이터와 비교한 결과 고체와 액체 각각에 대해 0.24와 0.36의 결정계수(R^2)를 얻었으며, Lee 등의 ART(버전 1.5), Stoffenmanager(버전 7.0), ECETOC TRA(버전 3.1)을 비교하는 2019년 연구에서는 ECETOC TRA 모델을 평가한 결과 8시간 TWA에 대한 Pearson 상관계수값은 0.55이었다. 본 연구에서 실제 노출값과 노출 추정값의 상관성은 결정계수 0.12로 높지 않았지만, 노출 추정값의 대다수(69.4%; 1/5배 ~ 1배: 32.7%; 1배 ~ 5배: 26.7%)는 실제 노출값의 1/5배 ~ 5배 사이에 형성되었다.

낮은 tier의 추정모델인 ECETOC TRA는 작업환경의 노출평가 툴로서 적은 자료의 요구, 사용의 용이성 등의 장점이 있는(Kupczewska-Dobecka et al., 2011) 반면, 작업환경의 노출수준에 대해 대략적인 추정값을 제시하기 때문에 스크리닝 모델로서의 기능이 더 강조된다. 이에 따라 ECETOC TRA에서 산출되는 노출 추정값은 실제 노출값을 정확히 예측하기 보다는 실제 노출값과 적당히 높은 수준의 상관관계(correlation)와 함께 상당히 높은 수준의 보수적 추정(과대평가) 경향성이 더욱 중요하다(Spinazze et al., 2017; Lee et al., 2019). 그러나 몇몇 tier 1 모델은 충분히 보수적인 추정값을 산출하지 않는 것으로 보고되고 있다(ECHA, 2016; van Tongeren et al., 2017; Lee et al., 2019). 이러한 특성을 고려하여 노출추정 모델을 평가하는 다수의 연구에서 노출모델의 보수적 추정정도에 관심을 갖고 이를 평가하였다.

특히, 국내 유기용제 관련 자료를 이용하여 노출모델을 평가한 Lee 등의 2019년 연구에서는 ECETOC TRA는 8시간 TWA에 대해 50% 보다 적은 47.69%만의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값보다 큰 것으로 조사되었으며, 8시간 TWA에 대해 ECETOC TRA의 $\text{bias} \pm \text{precision}$ 은 -1.94 ± 4.18 로 계산되어 ART, Stoffenmanager 등 높은 tier의 노출모델보다 심하게 과소평가 하는 것으로 보고하고 있다. Savic 등의 2023년 연구에서는 ECETOC TRA 평가결과 액체, 고체에 대한 데이터 모두에서 80%의 데이터가 노출 추정값이 실제 노출값보다 큰 과대평가로 확인되었다. 본 연구에서는 추정의 보수적 경향성 평가에서 전체 데이터를 이용한 경우 58.3%, 75% 분위수를 이용한 평가에서는 48.8%가 과대평가되어 충분히 보수적으로 평가되지 않는 것으로 확인되었다.

추정의 보수적 경향성과 관련하여 특이한 것은 실제 노출값에 따라 그 경향성이 변한다는 것이다. 구체적으로는 실제 노출값이 낮은 경우 과대평가 되는 반면, 실제 노출값이 높아지면서 보수적 추정 경향성이 줄어들어 결국 과소평가를 보이게 되었다. 실제 노출값의 크기에 따른 추정값의 이러한 경향성은 다른 연구에서도 유사하게 나타난다. ECETOC TRA를 비롯하여

ART, Stoffenmanager 역시 낮은 노출값은 과대평가하고 높은 노출값은 과소평가 하는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2019; Landberg et al., 2017; Marquart et al., 2017; Savic et al., 2017, 2023).

노출변수별로 입력값에 따른 노출 추정값의 과대/과소 평가 경향성을 살펴 보기 위해 노출 추정값과 실제 노출값과의 차이에 대해 노출변수를 독립변수로 하여 다중 회귀분석한 결과 PROC(공정범주)에 대하여는 PROC8a, PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19 등에서, ‘국소배기 설치·가동 여부(yes/no)’에서는 국소배기 설치·가동(yes)이, 노출시간에서는 ‘15분에서 1시간’의 입력값이 음의 값의 계수를 보여 각 변수의 다른 입력값에 비해 이러한 입력값에서 과소평가되기 쉬운 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 전체 데이터를 이용한 경우와 75% 데이터를 이용한 경우가 동일하였다. 반면, ETEAM 연구(van Tongeren et al., 2017)에서는 PROC7, PROC14, PROC15, PROC19를 입력하는 경우 과소평가 경향이 있다고 하였으며, Savic 등의 2023년 연구에서는 PROC7, PROC10, PROC14, PROC19 등을 선택하는 경우 과소평가가 발생하는 것으로 분석하여 연구별로 결과가 상이했다. 본 연구에서는 노출변수별 노출 추정값의 과대/과소 평가 기여도를 살펴보기 위해 추가적으로 시각화를 하였다. 일부 입력값에 대하여는 그래프와 다중 회귀분석의 결과가 다르게 보이기도 하는데, 이는 모든 데이터가 각 입력값에 대해 균일하게 분포하지 않아서 그렇기 때문일 수 있다. 예를 들어, 그래프에서는 시각적으로 PROC8b, PROC13의 입력값에서 분포상 과대평가 경향이 있는 것으로 보이나 회귀분석 결과에서는 통계적으로 유의하게 계수가 음의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 노출 추정값과 실제 노출값과의 차이인 $\text{delta}_{\text{TRA}}$ 를 종속변수로, 노출변수를 독립변수로 하여 다중 회귀분석한 결과에서 계수가 양수인 경우 노출 추정에서 과대평가에, 음수인 경우 과소평가에 우호적으로 기여한다. 따라서 각 변수별로 데이터 수집결과 빈도수가 가장 높은 입력값을 선택하여 PROC13, 국소배기장치 설치·가동, 중간정도 증기 휘발성, 기본 환기상태, ‘15분에서 1시간’ 작업시간, 100% 농도 혼합물 등의 조건으로 75% 데이터를 이용한 회귀식에 적용하는

경우, $\text{delta} = -0.34 - 0.52 - 0.88 + 0 + 0.35 - 0.30 + 1.21 = -0.48$ 이 된다. 이는 노출 추정값이 실제 노출값의 $10^{-0.48}$ 배 또는 0.33배가 되어 과소평가 되는 것을 의미한다.

ECETOC TRA와는 별개로 작업환경측정결과를 이용하고 이를 ECETOC TRA의 노출변수 중 이용 가능한 변수인 PROC(공정범주), 증기의 휘발정도(fugacity), 환기방식, 노출시간, 함유량 등 5개 변수를 독립변수로 적용하여 (전체 데이터 또는 75% 분위수 데이터) x (ECETOC TRA의 노출변수 또는 ECETOC TRA의 노출변수와 추가변수)의 경우에 따라 각각 다중 선형 회귀 분석한 결과 조정 결정계수(R^2)는 0.32~0.36으로 주어진 변수로 노출수준의 변동을 설명하기에는 다소 부족하였다. 노출 추정의 보수적 경향과 관련해서는 4개 회귀식에서 모두 대다수의 추정값이 실제값의 1/5배 ~ 5배 사이에 분포하여 낮은 결정계수에도 불구하고 추정값이 실제값으로부터 멀리 떨어진 정도는 크지 않았다. 앞서 언급한 대로 tier 1 모델은 모델의 독립변수인 노출변수가 실제 노출값의 변동을 설명하기에 부족하여 실제값과의 상관정도가 다소 불안정하기 때문에 보수적인 추정 경향성이 더 중요할 수 있는데, 4개 회귀식에서 모두 추정값이 실제값보다 큰 과대평가의 비율은 46~67% 수준에 머물렀다. 이에 대한 보완으로 75% 분위수보다 큰 데이터를 이용하는 것을 고려할 수 있을 것이나, 보수적 추정 경향성을 지나치게 강조하여 추정값이 실제 노출값보다 심하게 과대평가 되는 경우 스크리닝 툴로서의 기능이 약화될 것으로 생각된다. 실제로 95%와 99% 분위수 데이터를 이용하여 같은 분석을 한 결과, 과대 평가 경향은 92~99% 사이로 75% 분위수를 이용한 경우의 65~67% 수준보다 현저하게 증가한 반면, 추정값이 실제값의 1/5배 ~ 5배 사이에 집중하는 경향성은 감소하였다.

본 연구의 제한점으로는 첫째, 작업환경측정결과는 데이터의 양에서 유리한 점이 있으나 노출량 추정을 위한 변수를 추출하기에는 정보가 구체적이지 않다는 것이다. 따라서 제한된 기술내용으로부터 노출모델이 요구하는 입력 값을 추출하는 경우 변이가 많이 발생할 수 밖에 없다. 다수의 연구(Landberg

et al., 2015; Lamb et al., 2017; Savic et al., 2019)가 이 점에 주목하여 평가자간 변동을 측정하려 하기도 했으며, 평가자간 가장 많은 차이가 발생하는 항목으로는 작업활동과 관련한 입력값으로 보고하기도 하였다(Lamb et al., 2017). 여기에 더해 실제 작업환경은 그 작업형태, 작업시간, 환기방식 등이 단일 작업일 내에서도 매우 변동이 심하여 문제를 더욱 어렵게 하는 면이 있다. 이러한 이유로 특히나, 낮은 tier의 모델일수록 정확한 예측보다는 예측의 보수적 경향성에 주목하여 그 성능을 평가하는 것이 타당할 것으로 보인다. 둘째, 작업환경측정자료 중 TCE를 대상으로 하여 작업형태, 작업시간, 혼합물 내 농도 등에서 한쪽으로 치우친 데이터로 인해 각 입력변수별 데이터가 균등하지 않거나, 해당되지 않는 입력값의 평가에 제한이 있었다. 예를 들어, 본 연구에서 TCE를 사용하는 작업환경에 대한 측정결과를 분석한 결과, 확인되는 PROC(공정범주)는 PROC7, PROC8a, PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19 등으로 제한이 있었다. 이러한 이유로 대상이 되는 화학물질의 특성에 따라 노출의 양상이 달라질 가능성이 있어 본 연구의 결과를 충분한 고려없이 다른 화학물질에 적용하는 것에는 주의가 필요할 것으로 보인다.

2. 결론

본 연구에서는 국내 작업환경측정결과 자료를 이용하여 ECETOC TRA 노출모델을 평가하였다. 노출 추정값과 실제 노출값을 로그변환하여 선형 회귀분석한 결과에서 조정 결정계수(R^2)는 0.12로 낮은 상관성을 보였다. 노출 추정값과 실제 노출값과의 차이를 분석한 결과 실제 노출값이 낮은 경우 과대평가를, 높은 경우 과소평가를 하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 노출 추정값은 전체 데이터를 이용한 경우 58.3%, 75% 분위수 데이터를 이용한 경우 48.8%가 실제 노출값보다 크게 평가되는 것으로 분석되었으며, 노출 추정값의 대부분은 실제 노출값의 1/5배 ~ 5배 사이에 형성되었다.

노출변수별 노출 추정에의 과대/과소 추정 기여도를 분석한 결과 PROC8a,

PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19 등에서, ‘국소배기 설치·가동 여부 (yes/no)’에서는 국소배기 설치·가동(yes)이, 노출시간에서는 ‘15분에서 1시간’의 입력값에서 과소평가되기 쉬운 것으로 분석되었다.

ECETOC TRA와는 별개로 작업환경측정결과를 이용하여 (전체 데이터 또는 75% 분위수 데이터) x (ECETOC TRA의 노출변수 또는 ECETOC TRA의 노출변수와 추가변수)의 4가지 경우에 따라 각각 선형 다중 회귀분석한 결과 조정 결정계수(R^2)는 0.32~0.36으로 주어진 변수로 노출수준의 변동을 설명하기에는 다소 부족하였다.

상기 이유로 ECETOC TRA는 작업환경 노출수준의 정확한 예측을 하는데 사용되기 보다는 노출평가의 계층화된 접근에 있어 스크리닝 도구로서 활용하는 것이 적합하며, 이를 위해 국내 작업환경에 대하여 ECETOC TRA 평가하여 적당히 높은 수준의 상관관계(correlation)와 함께 상당히 높은 수준의 보수적 추정(과대평가) 경향성을 보이도록 조정하는 것이 필요하다.

참고문헌

- 김기은, 김종운, 전현표 등. (2019). 공정 범주에 따른 ECETOC TRA 모델 평가로부터 도출한 한국 작업장 노출 평가 개선 방안. 한국환경보건학회지, 45(2), 173-185.
- 국립환경과학원. 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침. 2021.
- 국립환경과학원. 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성 해설서. 2021.
- 이나루, 이도희, 이혜진. 화학물질 노출 농도 결정 요인으로서 작업공정 및 활동 영향 분석. 안전보건공단 산업안전보건연구원; 2021
- 이나루, 이인섭, 정수진. 화학물질 노출관리를 위한 노출모델 적용 연구. 안전보건공단 산업안전보건연구원; 2020.
- 이혜진, 이나루, 한정희 등. 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화. 안전보건공단 산업안전보건연구원; 2023.
- 최은경, 김종운, 김상현, & 변성원. (2011). 유럽 신화학물질관리제도의 eSDS 에 첨부되는 노출시나리오 작성법 개발 동향. 청정기술, 17(4), 285-299.
- ECETOC. (2023) ECETOC TRA v3 Worker module: Comparison of measured and modelled shortterm inhalation and dermal exposure; Changes to tool settings (Technical Report No. 141). Brussels, Belgium: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals
- ECHA. (2016) Chapter R.14: occupational exposure assessment. In

- Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Helsinki, Finland: European Chemicals Agency.
- Fransman W. (2017) How accurate and reliable are exposure models? *Ann Work Expo Health*; 61: 907-10.
- Hwang GS. Study on the Improvement of Reliability Assessment of Work Environment Measurement in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*, 2019, 29(1) Page: 50-56
- Ishii S, Katagiri R, Kitamura K et al. (2017) Evaluation of the ECETOC TRA model for workplace inhalation exposure to ethylbenzene in Japan. *J Chem Health Safety*; 24: 8-20.
- Kupczewska-Dobecka M, Czerczak S, Jakubowski M. (2011) Evaluation of the TRA ECETOC model for inhalation workplace exposure to different organic solvents for selected process categories. *Int J ccup Med Environ Health*; 24: 208-17.
- Lamb J, Galea KS, Miller BG et al. (2017) Between-user reliability of tier 1 exposure assessment tools used under REACH. *Ann Work Expo Health*; 61: 939-53.
- Landberg HE, Axmon A, Westberg H et al. (2017) A study of the validity of two exposure assessment tools: Stoffenmanager and the Advanced REACH Tool. *Ann Work Expo Health*; 61: 575-88.
- Landberg HE, Berg P, Andersson L et al. (2015) Comparison and evaluation of multiple users' usage of the exposure and risk tool: Stoffenmanager 5.1. *Ann Occup Hyg*; 59: 821-35.

- Lee S, Lee K, & Kim H. (2019). Comparison of quantitative exposure models for occupational exposure to organic solvents in Korea. *Annals of work exposures and health*, 63(2), 197-217.
- Marquart H, Franken R, Goede H et al. (2017) Validation of the dermal exposure model in ECETOC TRA. *Ann Work Expo Health*; 61: 854-71.
- Mc Donnell PE, Schinkel JM, Coggins MA et al. (2011) Validation of the inhalable dust algorithm of the Advanced REACH Tool using a dataset from the pharmaceutical industry. *J Environ Monit*; 13: 1597-606.
- Savic N, Lee EG, Gasic B et al. (2019) Inter-assessor agreement for TREXMO and its models outside the translation framework. *Ann Work Expo Health*; 63: 814-20.
- Savic N, Gasic B, Schinkel J et al. (2017) Comparing the advanced REACH Tool's (ART) estimates with Switzerland's occupational exposure data. *Ann Work Expo Health*; 61: 954-64.
- Savic N, Urbanus J, Henschel O et al. (2023). ECETOC TRAv3: An in-depth comparison of publicly available measurement data sets with modelled estimates of occupational inhalation exposure to chemicals. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(4), 496-507.
- Spinazze A, Lunghini F, Campagnolo D et al. (2017) Accuracy evaluation of three modelling tools for occupational exposure assessment. *Ann Work Expo Health*; 61: 284-98.

van Tongeren M, Lamb J, Cherrie JW et al. (2017) Validation of lower tier exposure tools used for REACH: comparison of tools estimates with available exposure measurements. *Ann Work Expo Health*; 61: 921-38.

Walther BA, Moore JL. (2005) The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography*; 28: 815-29.



Abstract

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

Objectives

Currently, the main form of exposure assessment in Korea is workplace measurement, but this has limitations in assessing a wide range of chemical agents due to restrictions in measuring and/or analysing techniques. Accordingly, to support the principle of assessing all hazardous agents in line with the government's occupational health geared toward risk assessment, exposure assessment through exposure estimation is required. However, existing exposure assessment tools have been developed and evaluated based on data from limited regions, necessitating adjustments to suit national and regional exposure environments. To this end, this study aims to establish a foundation for applying the already developed exposure assessment tools to Korean work environments by verifying them based on the accumulated

workplace measurement results database. Furthermore, the study intends to identify factors influencing exposure using this data, and by combining these variables, confirms the relationship between exposure variables and exposure levels, thereby establishing a basis that can be extensively utilized for quantitative risk assessment of workplace chemicals.

Method

The selected hazardous substance, trichloroethylene, was analyzed using workplace environmental measurement results. Information related to input variables required by the ECETOC TRA model was extracted, collected, and organized in Excel. Data from workplace measurement results and reliability assessment results by the Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA) were encoded to match the format required by the model. When necessary due to lack of data, other information from measurement results, which later helped to infer necessary information, and separate literature were referenced for encoding. The validity of the ECETOC TRA model was evaluated using multiple indicators by comparing estimated exposure levels with actual exposure levels. The indicators used for evaluation were: Explanatory power of the model by analysing correlation between estimated and actual exposure levels (regression analysis and performance evaluation of regression equation); Conservatism evaluation through difference analysis, mean absolute error (MAE) calculation, and examination on the multiples of estimated exposure levels over actual ones; Analysis of under- or overestimation trends of the model estimation; Identification of the relationship between exposure variables and actual exposure levels through regression analysis. Analysis used non-zero

exposure data since TCE is assumed not to be used everyday at workplace. Additionally, the 75th percentile data for each exposure scenario is applied, considering ECETOC TRA's development based on the 75th percentile of exposure data.

Results

After processing data from workplace measurement result sheets into exposure scenarios, a general analysis based on variables such as number of workers, PROC, fugacity, ventilation method, exposure time, presence of local exhaust ventilation, and respiratory protective equipment revealed that workplaces with 50 or fewer employees accounted for about 79% of the total. For PROC, due to the characteristics of trichloroethylene mainly used as a cleaning agent, dipping operations (PROC13) accounted for about 58%. Regarding fugacity, about 76% showed medium volatility due to handling at room temperature, while about 24% showed high volatility due to heating in ultrasonic cleaning tanks for vapor degreasing. For ventilation methods, basic indoor ventilation accounted for about 66%, and good indoor ventilation for about 29%. Exposure duration of '15 minutes to 1 hour' and 'less than 15 minutes' were most common at 63% and 28% respectively, but caution is needed in interpretation due to the variable and intermittent nature of cleaning work. Local exhaust ventilation was installed and operating in about 76% of cases.

Analysis of the relationship between log-transformed actual exposure values and estimated exposure values showed a low degree of agreement, with an adjusted R-squared of 0.12 for both the entire dataset and the 75th percentile values.

Evaluation of the model's conservatism revealed a overestimation tendency for low actual exposure values and underestimation for high actual exposure values, regardless of the data. For the entire dataset, 58.3% of the data was overestimated, mostly within 1–5 times the actual exposure value. Similar results were found using the 75th percentile data, with 48.8% overestimated, mostly within 1–5 times the actual value.

Analysis of the contribution of exposure variables to estimation trends showed that PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19, 'local exhaust installed and operating (yes)', and exposure duration '15 minutes to 1 hour' were prone to underestimation.

Multiple linear regression analysis using workplace measurement results under four conditions yielded adjusted R-squared values of 0.32–0.36, insufficient to explain exposure level variations with given variables. The proportion of overestimated exposure estimates was 46–48% for the entire dataset and increased to 65–67% for the 75th percentile data. 87–89% and about 79% of estimates were within 1/5 to 5 times the actual exposure values for the entire and 75th percentile datasets, respectively. Additional analysis using 95th and 99th percentile data showed overestimation rates of 92–94% and 98–99%, with 57–59% and 34–36% of estimates falling within 1/5 to 5 times the actual values, respectively.

Conclusion

The study evaluated the ECETOC TRA exposure model using domestic workplace measurement data. Log-transformed linear regression analysis showed low correlation with an adjusted R-squared of 0.12.

The model tended to overestimate at low actual exposure levels and underestimate at high levels. Estimated exposure levels were higher than actual levels in 58.3% of cases using all data and 48.8% using 75th percentile data, with most estimates falling between 1/5 to 5 times the actual values. Analysis of variables' contribution to over/underestimation revealed that PROC8a, PROC8b, PROC13, PROC15, PROC19, local exhaust ventilation (yes), and exposure duration of "15 minutes to 1 hour" were prone to underestimation. Multiple linear regression analysis using workplace measurement results yielded adjusted R-squared values of 0.32–0.36, indicating insufficient explanation of exposure level variation. Given these reasons, ECETOC TRA is more suitable as a screening tool in a tiered approach to exposure assessment rather than for accurate prediction of workplace exposure levels. To improve its effectiveness, it should be adjusted to show moderately high correlation and considerably high conservative estimation tendency for domestic work environments.

Key words : Exposure estimation, ECETOC TRA, TCE, Work environment monitoring data

부록

1. 작업환경측정결과표 상의 수집정보

1. 예비조사 결과

가 - 1. 작업공정별 유해요인 분포 실태

[작업공정]	[유해인자]
원자재입고	
↓	
가 공	금속가공유
↓	
세 척	TCE
↓	
검 사	
↓	
출 하	

- 귀사의 실 근로시간은 11.5시간으로 작업환경측정 및 정도관리 등에 관한 고시 제34조에 의거 입자상 및 가스상 물질의 보정노출기준을 산출한 후 측정농도와 비교하여 평가하였습니다.
[근로시간 09:00 ~ 20:00 / 점심시간 12:30 ~ 13:30 / 저녁시간 18:00 ~ 18:30 / 야간조 근무시간 20:00 ~ 09:00 / 야간조 식사시간 00:00 ~ 01:30 / 작업시간이 긴 야간조 기준으로 근로시간 설정 / 2조2교대 11.5H]
(보정노출기준 = 8시간 노출기준 × 8/h)(h = 노출시간/일)
* 대표자가 주간조, 근로자2명이 야간조로 작업을 진행하고 있습니다.
* 월요일마다 야간조 1~2명이 주간조로 작업을 진행하고 있으며, 측정당일에는 근로자 1명이 주간조로 작업을 진행하고 있었습니다.
- 가공 단위작업장소의 소음은 80dB(A) 미만으로 제외하였습니다.
- 세척 공정은 작업환경측정 지침 시달(수정)('22.4.4. 산업보건기준과)에 의거 주요 염소계 탄화수소 5종 (TCE, MC 1,2-DCP, 클로로포름, 1,2-디클로로에틸렌)에 대한 작업환경측정을 실시하였습니다.
- 본 작업환경측정은 귀사에서 안내받은 현장 및 공정을 대상으로 취급물질목록 및 MSDS를 제공받아서 측정대상 유해인자를 선정하여 평가하였습니다.
본 보고서를 꼼꼼히 검토하시 후 취급유해물질의 누락 등이 없는지 검토하여 주시기 바랍니다.
차후 신규 취급화물물질 도입 및 변경, 공정의 신설 및 변경 등의 사항이 발생할 경우 작업환경 예비조사를 거쳐서 변경사항이 발생후 1개월 이내에 작업환경측정을 실시하여야 합니다.
따라서 상기와 같이 변경사항이 발생할 경우 즉시 본원으로 연락주시며, 원활한 작업환경관리가 이루어질 수 있도록 협조 부탁드립니다.

○ 작업공정별 유해요인 발생 실태

순번	공정명	유해위험인자	발생 실태
1	가공 및 세척	소음	기기가동음 및 에어건 사용으로 인한 소음이 발생되나 80dB(A) 미만으로 제외. 가공 작업시 절삭유 사용으로 인한 금속가공유 발생. 세척 작업시 TCE 사용으로 인한 TCE 발생.
2		금속가공유	
3		TCE	

나. 작업환경측정대상 공정 및 유해인자별 측정계획

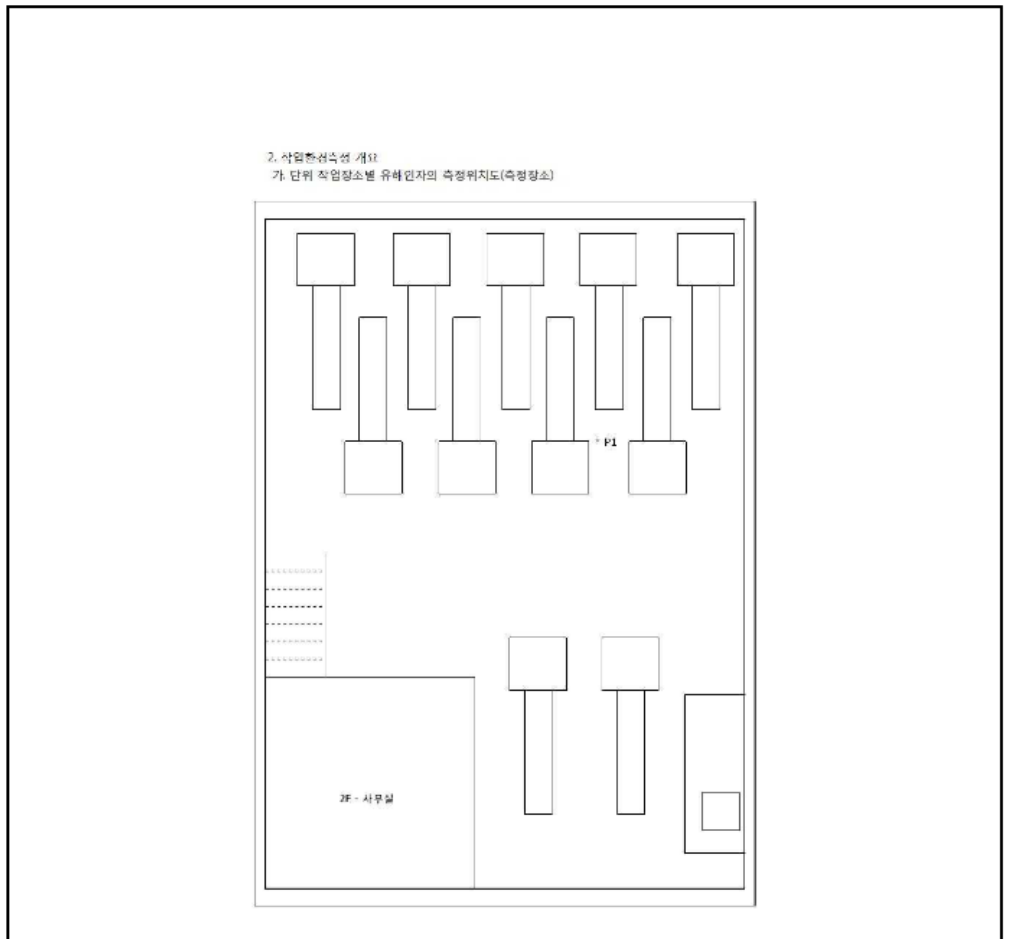
순번	측정대상 공정	측정대상 유해인자	유해인자 발생주기	근로자 수	작업시간	측정방법	예상 시료채취 또는 측정건수
					(폭로시간)	(개인 / 지역)	
1	MCT가공 및 세척	금속가공유	불규칙	2	690(690)	개인	1
2	MCT가공 및 세척	트리클로로에틸렌	불규칙		690(690)	개인	1

다. 공정별 유해화학물질 사용 상태

부서 또는 공정명	화학물질명 (상품명)	제조 또는 사용 여부	사용 용도	월 취급량 (m³·톤)	비고
MCT가공	ECOCUT 5028(에코 컷 5028)	사용	절삭유	500 ㄹ	
MCT가공	MOBIL VACTRA OIL NO. 2	사용	습동유	60 ㄹ	
세척	트리클로로에틸렌	사용	세정제	200 Kg	

2. 작업환경측정개요

가. 단위작업장소별 유해인자의 측정위치도(측정장소)



나-1. 단위작업장소별 작업환경측정결과 (소음제외)

○ 작업장기온 : 28 ℃

○ 작업장습도 : 48 %

2. 작업환경설비 실태 및 문제점

- 가공 단위작업장소는 가공작업시 가공기 배기장치를 설치하여 운영하고 있습니다.
- 전 단위작업장소의 MSDS의 비치 및 게시는 일부 양호합니다.
- 보호구 착용 표지판 및 보호구 착용 상태는 미흡합니다.

별첨 . MSDS 자료

번호	부서 또는 공정	화학물질명	MSDS관리
1	MCT가공	ECO CUT 5028(에코컷 5028)	수소처리된 중질 파라핀 정제유 (CAS NO. 64742-54-7)(82~92%), 칼슘 석유 설폰산(CAS NO. 61789-86-4)(3~10%), 2,4,4-트리메틸펜텐, 술폰리지드 (68515-88-8)(1~5%), 라드 기름 (CAS NO. 8016-28-2)(1~5%), 지방산, C16-18, 2-에틸헥실 에스테르(CAS NO. 91031-48-0)(0~1%), 영업비밀 (CAS NO. 영업비밀)(>1%) 2,6-디-tert-부틸-P-크레졸(CAS NO. 128-37-0)(0.1 - < 1%), 포스포릭산 에스테르, 아민염(CAS NO. Confidential)(0.1 - < 1%), 기유 1(CAS NO. 64742-65-0)(50~60%), 기유 2(CAS NO. 64742-65-0)(40~50%), 영업비밀 1(CAS . 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 2(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 3(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 등 트라이클로로에틸렌(CAS NO. 79-01-6)(100%)
2	MCT가공	MOBIL VACTRA OIL NO. 2	수소처리된 중질 파라핀 정제유 (CAS NO. 64742-54-7)(82~92%), 칼슘 석유 설폰산(CAS NO. 61789-86-4)(3~10%), 2,4,4-트리메틸펜텐, 술폰리지드 (68515-88-8)(1~5%), 라드 기름 (CAS NO. 8016-28-2)(1~5%), 지방산, C16-18, 2-에틸헥실 에스테르(CAS NO. 91031-48-0)(0~1%), 영업비밀 (CAS NO. 영업비밀)(>1%) 2,6-디-tert-부틸-P-크레졸(CAS NO. 128-37-0)(0.1 - < 1%), 포스포릭산 에스테르, 아민염(CAS NO. Confidential)(0.1 - < 1%), 기유 1(CAS NO. 64742-65-0)(50~60%), 기유 2(CAS NO. 64742-65-0)(40~50%), 영업비밀 1(CAS . 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 2(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 3(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 등 트라이클로로에틸렌(CAS NO. 79-01-6)(100%)
3	세척	트라이클로로에틸렌	수소처리된 중질 파라핀 정제유 (CAS NO. 64742-54-7)(82~92%), 칼슘 석유 설폰산(CAS NO. 61789-86-4)(3~10%), 2,4,4-트리메틸펜텐, 술폰리지드 (68515-88-8)(1~5%), 라드 기름 (CAS NO. 8016-28-2)(1~5%), 지방산, C16-18, 2-에틸헥실 에스테르(CAS NO. 91031-48-0)(0~1%), 영업비밀 (CAS NO. 영업비밀)(>1%) 2,6-디-tert-부틸-P-크레졸(CAS NO. 128-37-0)(0.1 - < 1%), 포스포릭산 에스테르, 아민염(CAS NO. Confidential)(0.1 - < 1%), 기유 1(CAS NO. 64742-65-0)(50~60%), 기유 2(CAS NO. 64742-65-0)(40~50%), 영업비밀 1(CAS . 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 2(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 영업비밀 3(CAS NO. 영업비밀)(1~5%), 등 트라이클로로에틸렌(CAS NO. 79-01-6)(100%)

2. PROC(공정범주) 설명 및 예시

(출처 : 국립환경과학원 「화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침(2021)」)

PROC (공정범주)	공정 설명	설명 및 예시
PROC1	노출 우려가 거의 없는 밀폐된 공정에서의 물질 제조 또는 정제	노출 우려가 없는 밀폐된 연속 공정에서 물질의 제조, 혼합물 생산 또는 이와 유사한 가공공정. 공정을 구성하는 차단된 물질수송이나 밀폐 시료채취 등은 포함됨. 개방된 물질 수송은 제외
PROC2	통제된 조건하의 간헐적인 노출이 있는 밀폐된 연속 공정에서의 물질 제조 또는 정제	밀폐된 연속 공정에서 물질의 제조, 혼합물 생산 공정 또는 이와 유사한 가공공정 (매우 제한적인 인간의 개입이 요구되는 자동화 공정). 연속식 화학물질 생산이나, 정제 공정이며, 간헐적으로 제한된 노출 발생 가능
PROC3	통제된 조건하의 간헐적 노출 또는 이와 동일한 수준의 노출 방지 조건을 갖춘 화학산업 등의 밀폐된 회분 공정에서 물질의 제조 또는 혼합(조제)	밀폐된 회분 공정에서 물질 제조, 혼합물 생산 공정 또는 이와 유사한 가공 공정. 간헐적으로 제한된 노출이 발생할 수 있음 (공정을 구성하는 차단된 물질 수송 등은 포함되나, 개방된 물질 수송은 배제됨)
PROC4	특정 상황 또는 조건하에서 노출이 발생할 수 있는 화학물질 제조	노출을 근본적으로 배제할 수 없는 일반적인 제조 또는 혼합물 생산등의 공정 (공정을 구성하는 차단된 물질 수송 등은 포함되나, 개방된 물질 수송은 배제됨)
PROC5	회분 공정에서의 혼합 또는 배합	최종 사용을 포함하여 제조, 배합(조제) 상황에서의 고상 또는 액상 물질의 혼합 또는 배합하는 공정. 혼합 용기를 채우거나 비우는 과정과 혼합한 물질 시료 채취 등은 별도의 PROC에서 고려
PROC6	광택 작업	상온 온도 이상에서 넓은 표면을 처리하는 공정 (섬유, 고무, 종이 등의 광택작업 등)
PROC7	산업적 스프레이 작업 (폐수, 폐기물 발생이 있음)	공기중에 분산시키는 기술을 적용한 공정. 압축공기, 유압방식, 회전력 방식 등을 적용

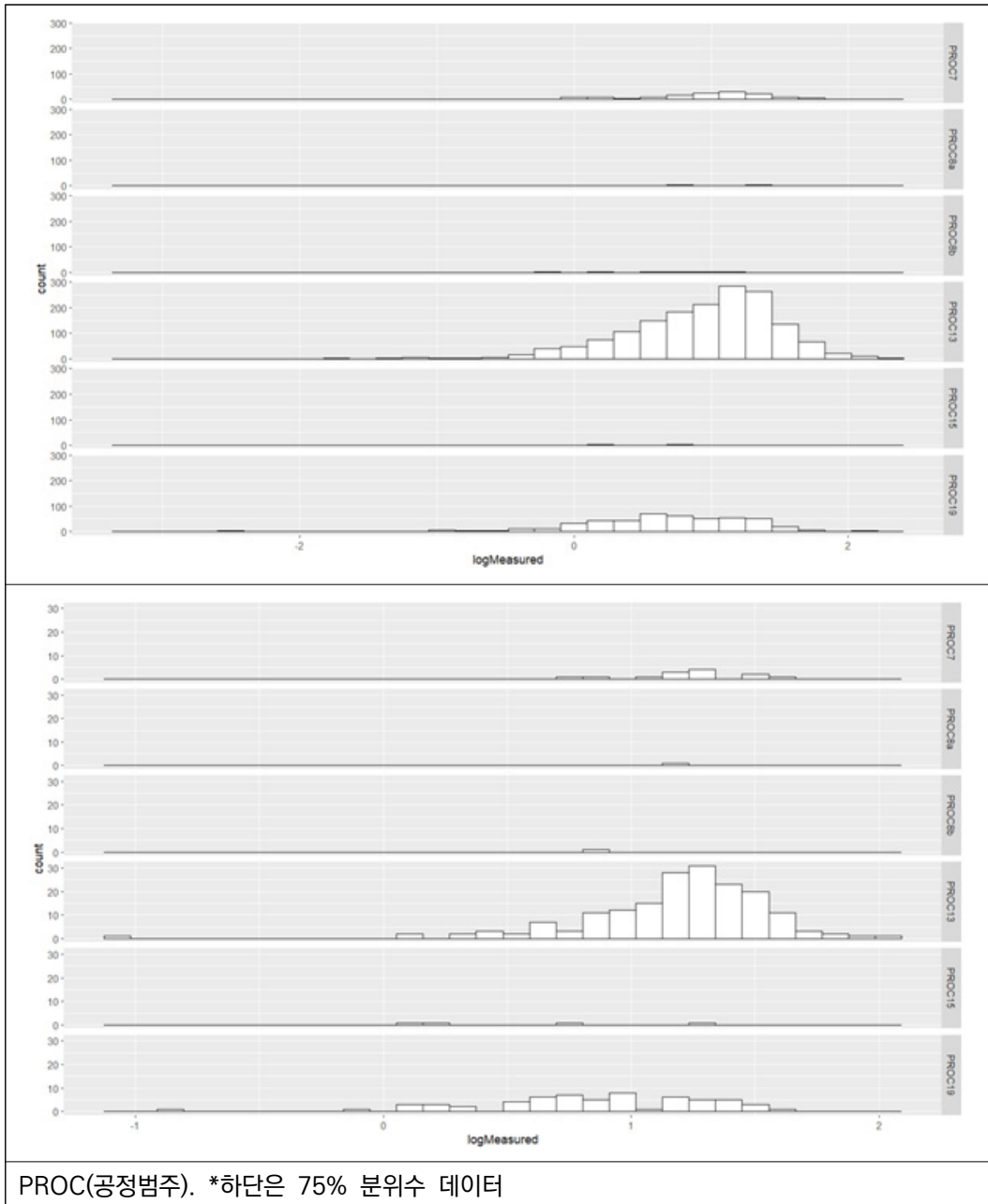
PROC (공정범주)	공정 설명	설명 및 예시
PROC8a	<p>지정된 노출저감 시설이 적용되지 않는 상황에서의 물질 및 혼합물 이송(채우거나 비우는 과정)</p>	<p>한 분말 또는 액상 물질의 분산 (표면 코팅, 접착제 적용, 광내기, 세척, 공기관리 제품 분사, 강한 바람을 활용한 분사 등). 산업적 스프레이 작업은 관리감독과 작업절차서에 따라 훈련받은 작업자가 작업하는 상황을 의미함. 작업 시 기술적 노출 통제가 적용되며, 노출통제 장치도 훈련 받은자에 의해 운영되며, 주기적인 유지관리 시행. 단순한 산업현장만을 의미하는 것이 아님</p>
PROC8b	<p>고정형 저장시설에 저장 또는 저장 시설로부터 이송, 운반</p>	<p>기술적인 노출통제가 이루어지지 않는 상황에서 대량의 화학물질(용기, 컨테이너, 시설, 장치에서 또는 장치로 이송하는 작업 (충진, 투기, 선적, 자루/포대에 채우는 작업, 무게측정 등의 활동 포함)</p> <p>지정된 노출 통제 기술을 적용한 용기, 컨테이너로의 일반적인 물질 이송 작업. 대량(수십킬로이상) 물질 이송을 위해 설계 및 운영되는 곳에서의 물질 이송 작업을 의미하며, 물질 이송 자체보다는 장치연결이나 분리 작업 시 노출이 발생. 대형 트럭이나 선박에 물질 적재 시 또는 드럼통을 채우는 상황에 해당함.</p>
PROC9	<p>물질 또는 혼합물을 지정 주입 라인을 통해 소형 용기로 주입하는 공정 (무게 측정을 위한 과정 등을 포함)</p>	<p>물질이송은 선적, 충전, 하역, 포대에 채우는 작업 등을포함</p> <p>증기 및 에어로졸 배출이나 누출(흘리는 것 등 포함)을 최소화하기 위해 지정 주입 라인을 활용 소형 용기로의 주입 공정 (시료채취 작업 등에 적용 가능)</p>
PROC10	<p>롤러 및 브러시 작업</p>	<p>롤러나 브러시를 활용 페인트 코팅제, 접착제 등을 표면에 적용하는 작업이며, 적용 시 튀는 과정에서 노출이 발생할 수 있음. 길게 뻗어있는 분출구를 갖는 분사 및 분무 기구를 활용한 세척 작업 등도 여기에 해당함</p>

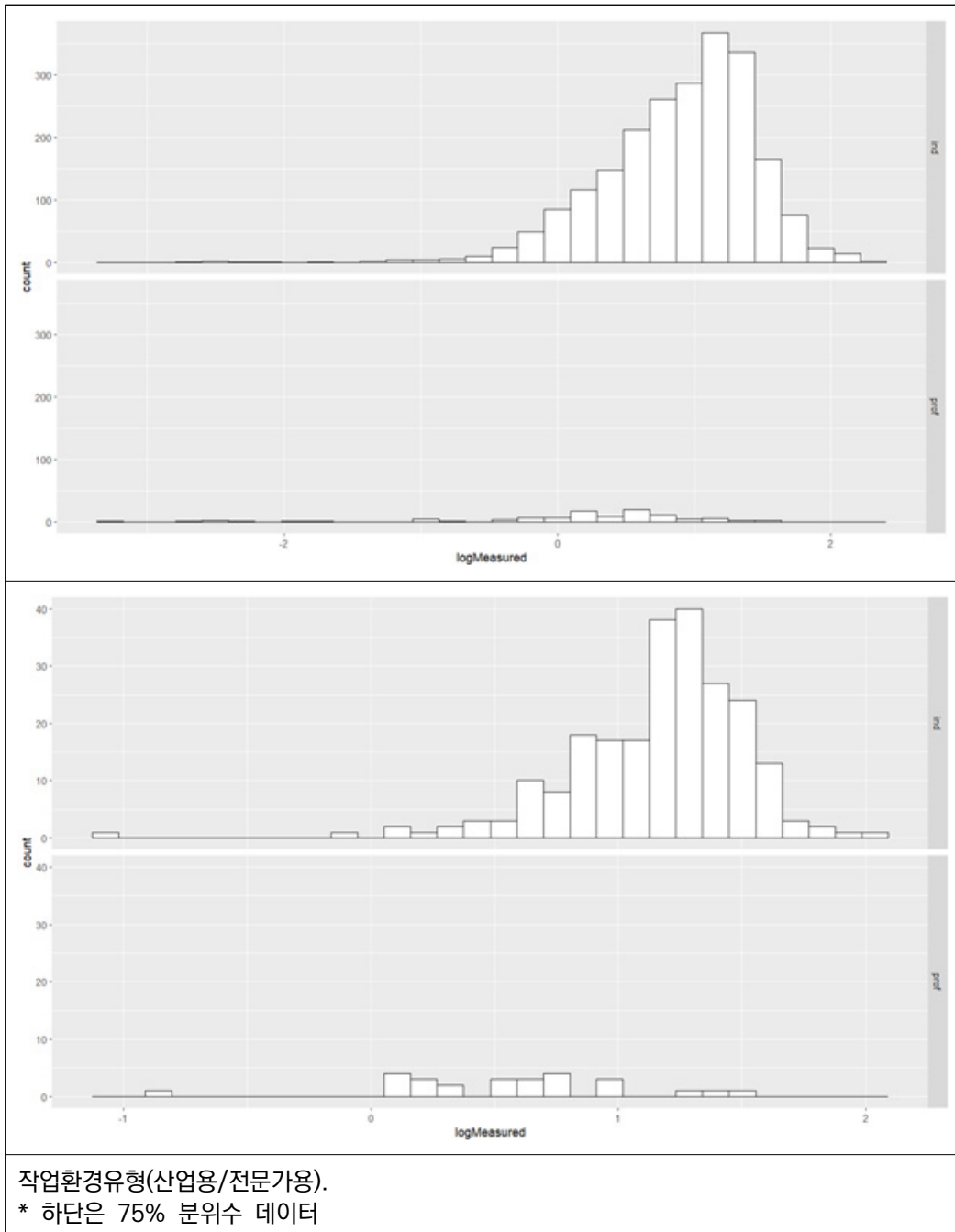
PROC (공정범주)	공정 설명	설명 및 예시
PROC11 *전문가용	비산업적 스프레이 작업(폐수, 폐기물 발생이 없음)	공기 중에 분산시키는 기술을 적용한 공정. 압축공기, 유압방식, 회전력 방식 등을 적용한 분말 또는 액상 물질의 분산 (표면 코팅, 접착제 적용, 광내기, 세척, 공기 관리 제품 분사, 강한 바람을 활용한 분사 등). 비산업적 스프레이 작업은 PROC7의 조건을 만족시키지 않는 경우에 해당. 산업현장 이외에서 적용하는 것을 의미하는 것이 아님
PROC12	발포제를 사용하여 발포제품을 제조하는 공정	액상의 혼합물에 기포를 발생시켜 발포제품을 제조하는 공정
PROC13	담그거나, 들이부어 완제품 처리	완제품을 물질에 담그거나, 적시거나, 붓거나, 세척하거나 하는 공정 및 해당 처리제품을 취급하는 공정. 완제품의 service life는 적용안함
PROC14	정제, 압축, 압출, 펠렛타이징, 알갱이화	정제화(등글넙적한 알갱이로 만드는 것), 압축, 압출, 알갱이화 과정을 통해 물질 또는 혼합물을 특정 형태로 가공하여 나중에 사용할 수 있도록 함
PROC15	소규모 연구소에 실험실 시약으로 사용	소규모 실험실에서 물질 사용 (1L 또는 1kg 이하의 양). 실험실에서 많은 양의 물질 사용이나 연구개발 시설 등은 산업 공정에 적용. 품질관리 과정도 포함됨
PROC16	연료 사용 공정	고체, 액체 연료 (첨가제 포함)의 사용. 비연소 연료에 대한 노출이 제한적인 밀폐된 이송 공정을 포함. PROC16을 선택한 경우 PROC8, PROC9의 추가 선택 필요 없음. 연소 가스에 대한 노출은 제외됨
PROC17	고온, 고압 조건에서 윤활제를 사용하는 금속 작업 공정	윤활제가 높은 온도와 마찰에 노출되는 금속 작업 공정(구멍을 뚫거나 연마, 압연, 성형 과정 등). 저장용기에 물질을 채우는 공정은 제외
PROC18	높은 운동에너지가 발생하는 조건에서 윤활제나 그리스의 사용	높은 운동에너지 조건에서 윤활제나 그리스를 사용하는 공정 (자동 및 수동 적용 공정 모두 가능). 채우는 공정은 제외

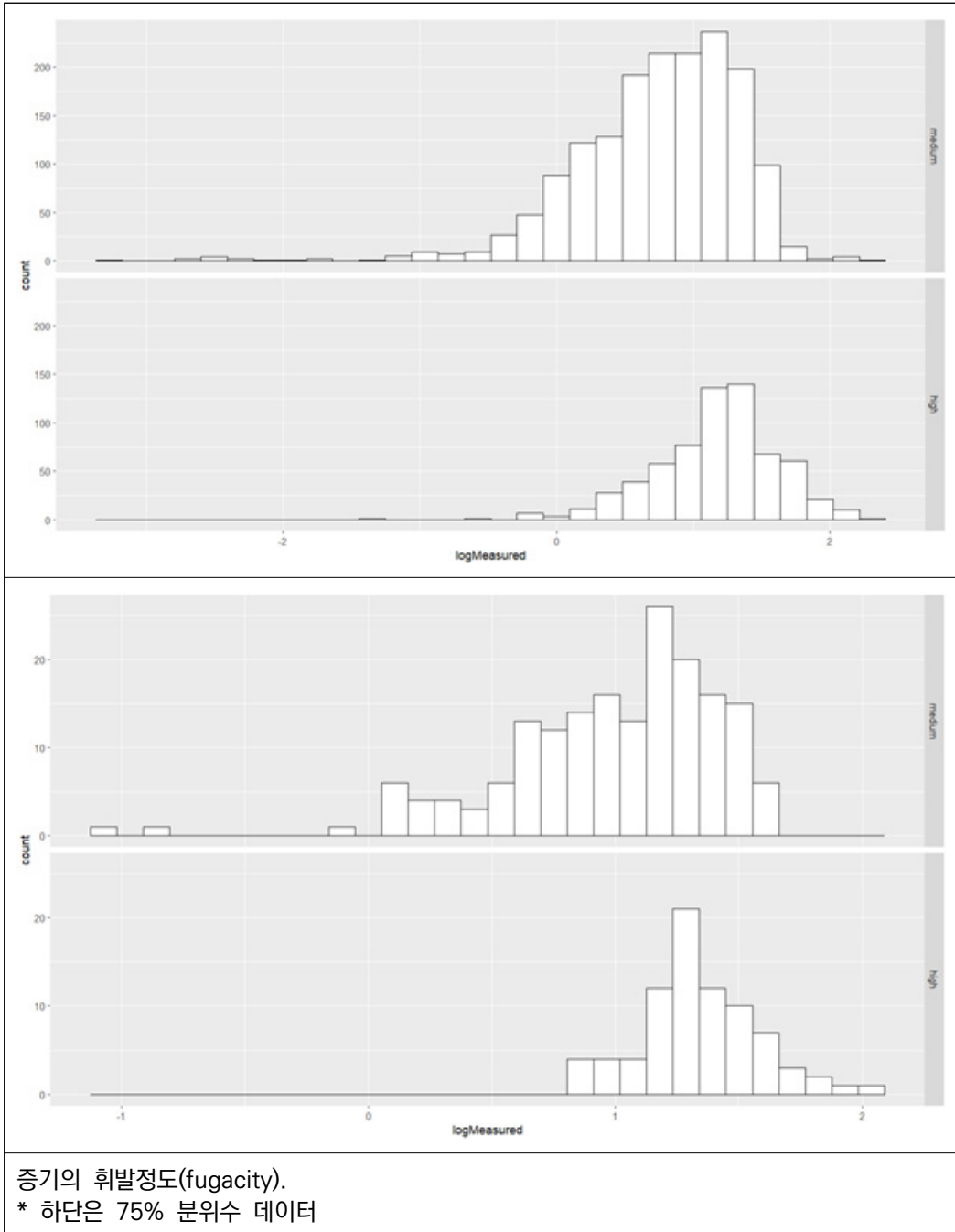
PROC (공정범주)	공정 설명	설명 및 예시
PROC19	손과 팔뚝 노출이 있는 수작업 활동	개인보호장구 이외에 적용할 수 있는 노출 제어 장치가 없고, 손과 팔뚝의 노출이 있는 수작업 활동 (예: 공사장에서 시멘트 혼합작업, 염색/탈색약 혼합 작업)
PROC20 *전문가용	소형 장치 내에서 사용하는 기능성 유체의 사용 공정	소형 장치 내 사용 기능성 유체를 채우거나 비우는 공정. 열, 압력 전달 유체 등의 정기적인 교체 과정에서 발생. 엔진, 브레이크, 가정용기기 오일 등을 채우거나 비우는 공정.
PROC21	낮은 에너지 조작이나 재료 또는 완제품에 붙어있는 물질 취급	원/부자재 또는 완제품의수동 절삭, 냉연, 조립/분해등이 포함됨. 대형금속 등의 물체의 이송 및 취급도 포함.
PROC22 *산업용, 고체	높은 온도에서 광물이나 금속을 제조, 가공하는 공정	고로, 용광로, 제련소, 소규모 용광로 등 높은 온도에서 광물이나 금속을 제조, 가공하는 공정. 주물, 탭핑, 드로싱 공정은 제외 온도가 낮아진 차가운 재료의 취급은 PROC21과 PROC26을 적용함 (주물, 단조,부 유물 제거 등의 공정은 제외됨) 주소, 로에서 용융금속 유출 공정, 로에서의 부유물 제거공정은 제외됨)
PROC23 *고체	상당히 높은 온도에서 물질의 이송이나 개방된 작업 공정	용융로, 용광로, 오븐 등에서 행해지는 주물 (액체 금속을 틀에 붓는 공정), 탭핑(용광로를 열고 용융 금속 등을 붓는 공정), 드로싱 (용융 금속 표면에서 거품 등의 제거 공정) 아연도금을 위한 고온 담금, 포장과정에서 용융 고상물의 제거, 물을 사용한 고상입자 제조 등을 포함. 온도가 낮아진 차가운 재료의 취급은 PROC21과 PROC26을 적용함
PROC24 *고체	완제품 또는 재료에 결합되어 있는 물질의 정련 작업 등	완제품 또는 재료에 상당한 열 또는 운동 에너지를 적용한 물질 가공(압연, 성형, 연마, 기계적 절삭, 천공, 모래로 매끄럽게 하는 작업, 깎아내는 작업 등을 포함)

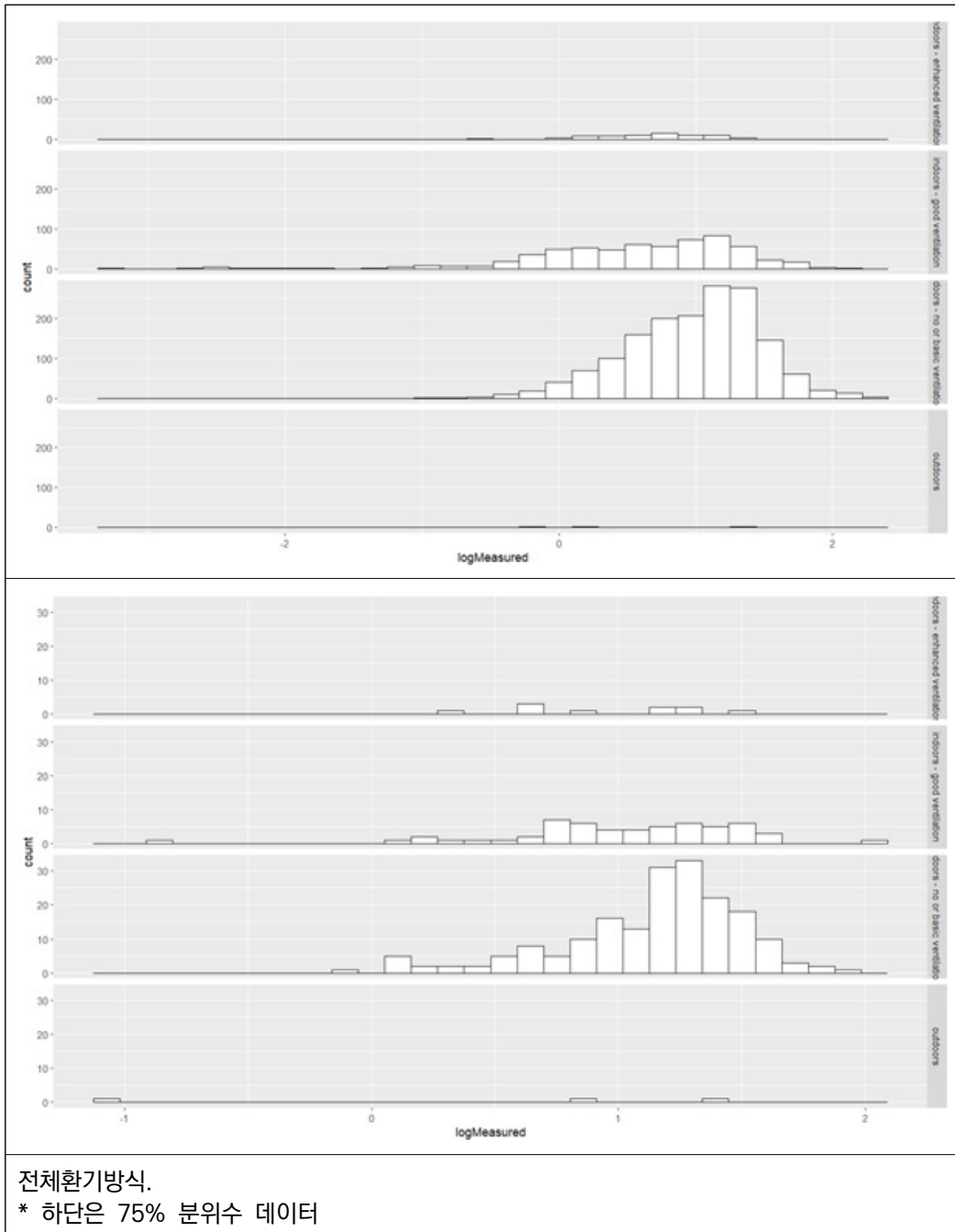
PROC (공정범주)	공정 설명	설명 및 예시
PROC25 *고체	기타 금속을 활용한 고온 작업	기타 금속을 활용한 고온 작업 (용접, 땀질, 구멍 뚫기, 불꽃 절삭 등)
PROC26 *ECETOC TRA 적용불가	상온에서 고체 무기화학물질의 취급	상온에서 고상(입자상 물질 등)의 무기물질의 취급(광석, 광석 농축물, 금속, 기타 무기물질 등). 대형 물체의 취급 제외(대형 물체 취급은 PROC21). PROC26을 선택하면 PROC8a, PROC8b, PROC9는 선택할 필요 없음
PROC27a *ECETOC TRA 적용불가	금속 분말 제조(고온 공정)	고온 야금 공정을 통해 금속 분말 제조 (미립화, 건조분산 등)
PROC27b *ECETOC TRA 적용불가	금속 분말 제조(습식 공정)	습식 야금 공정을 통해 금속 분말 제조(전기 분해, 습식분산 등)
PROC28 *ECETOC TRA 적용불가	장치 등의 유지보수 (세척 또는 수리 등)	다른 공정범주에 포함되지 않는 유지보수 활동 <ul style="list-style-type: none"> • 밀폐공정을 개방하고 세척을 위해 내부로 들어가는 활동 • 교대로 또는 간간히 수행되는 전용/개별 세척작업 • 장치 주위에 튀 물질 제거, 필터 제거 및 필터에서 물질 제거 • 입자상 물질 취급과정에서 발생하는 먼지 침적 등에 따라 장치와 직접적으로 연계되지 않은 주위 바닥세척

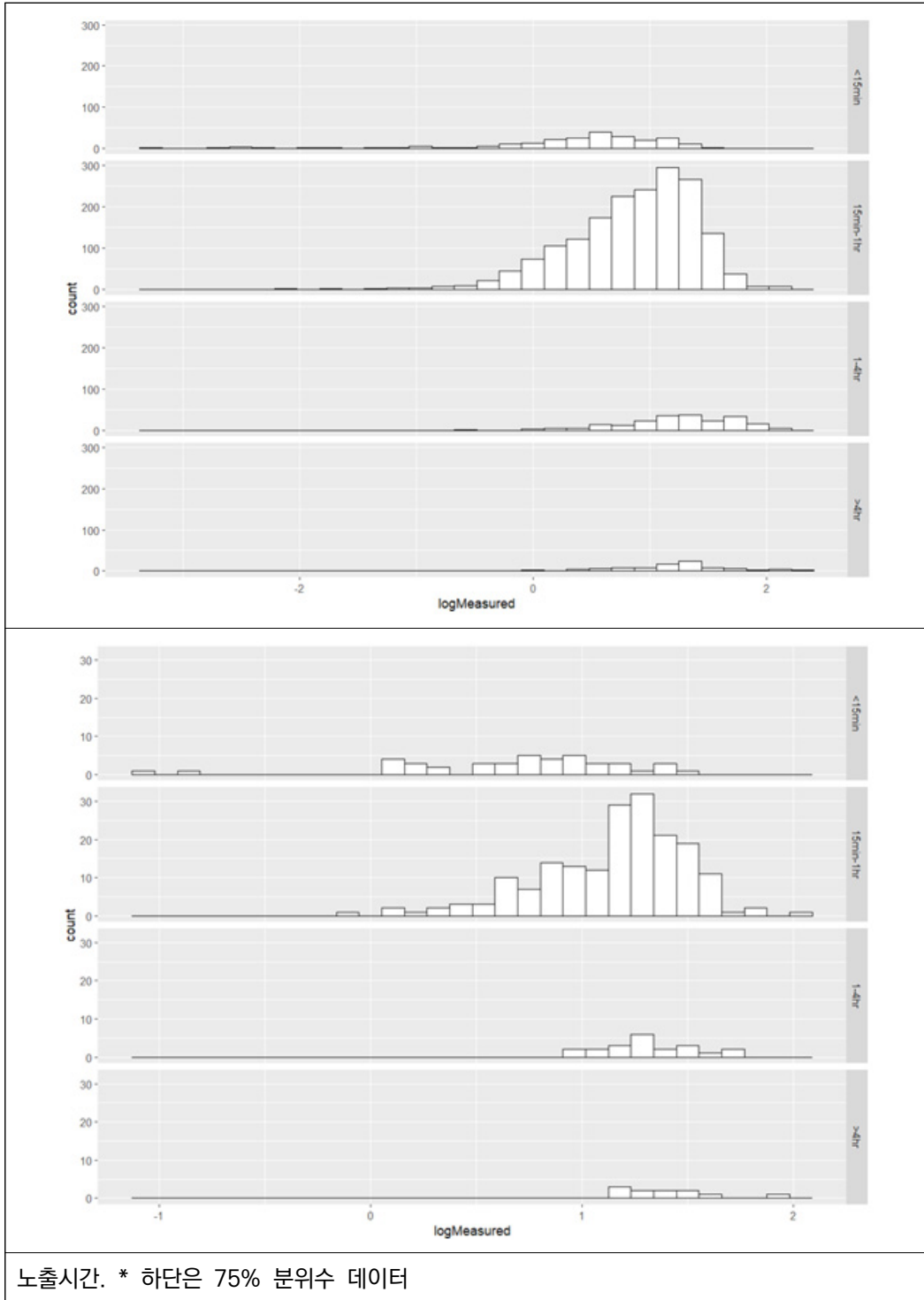
3. 주요 노출변수별 측정데이터 분포

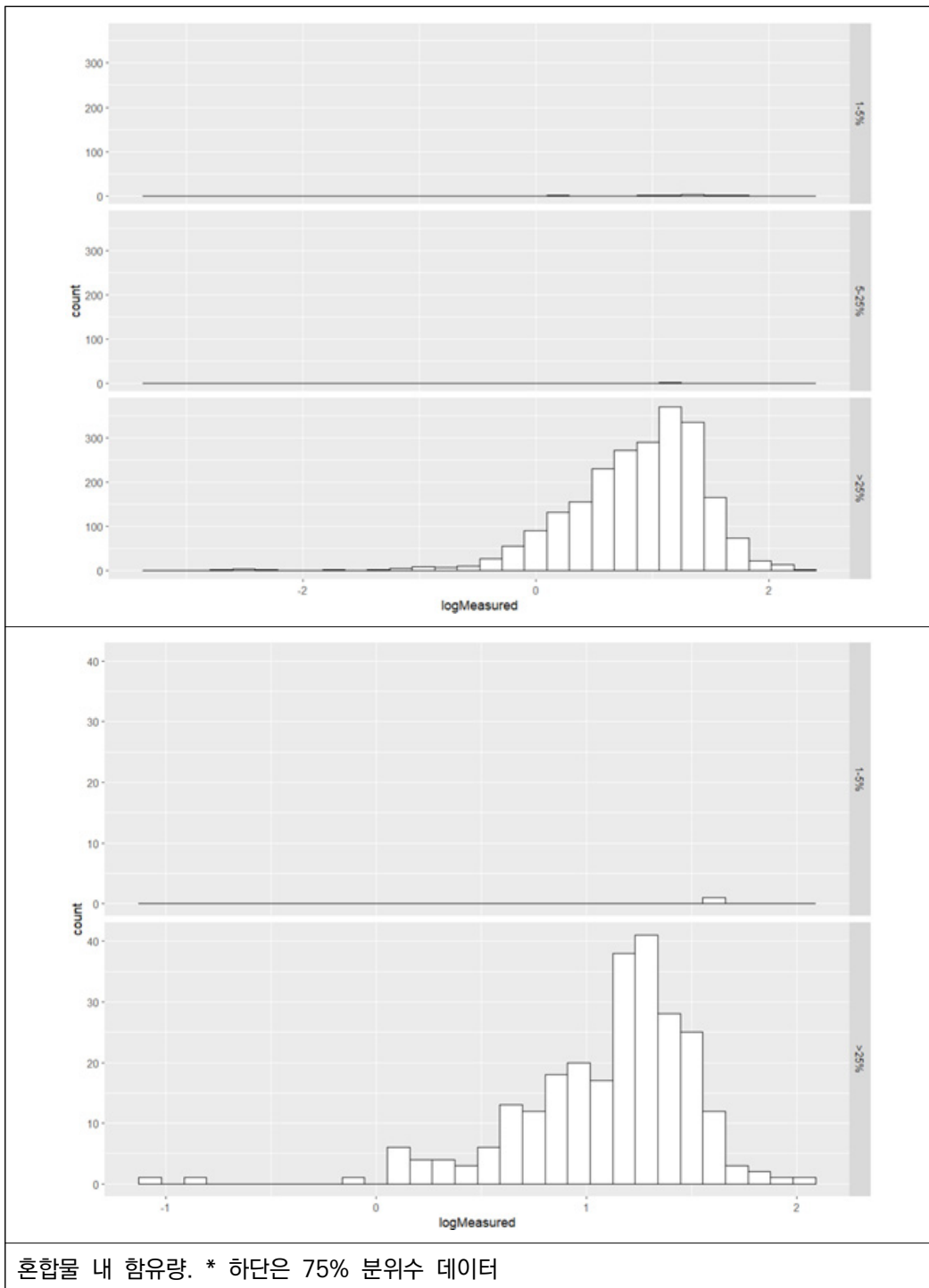


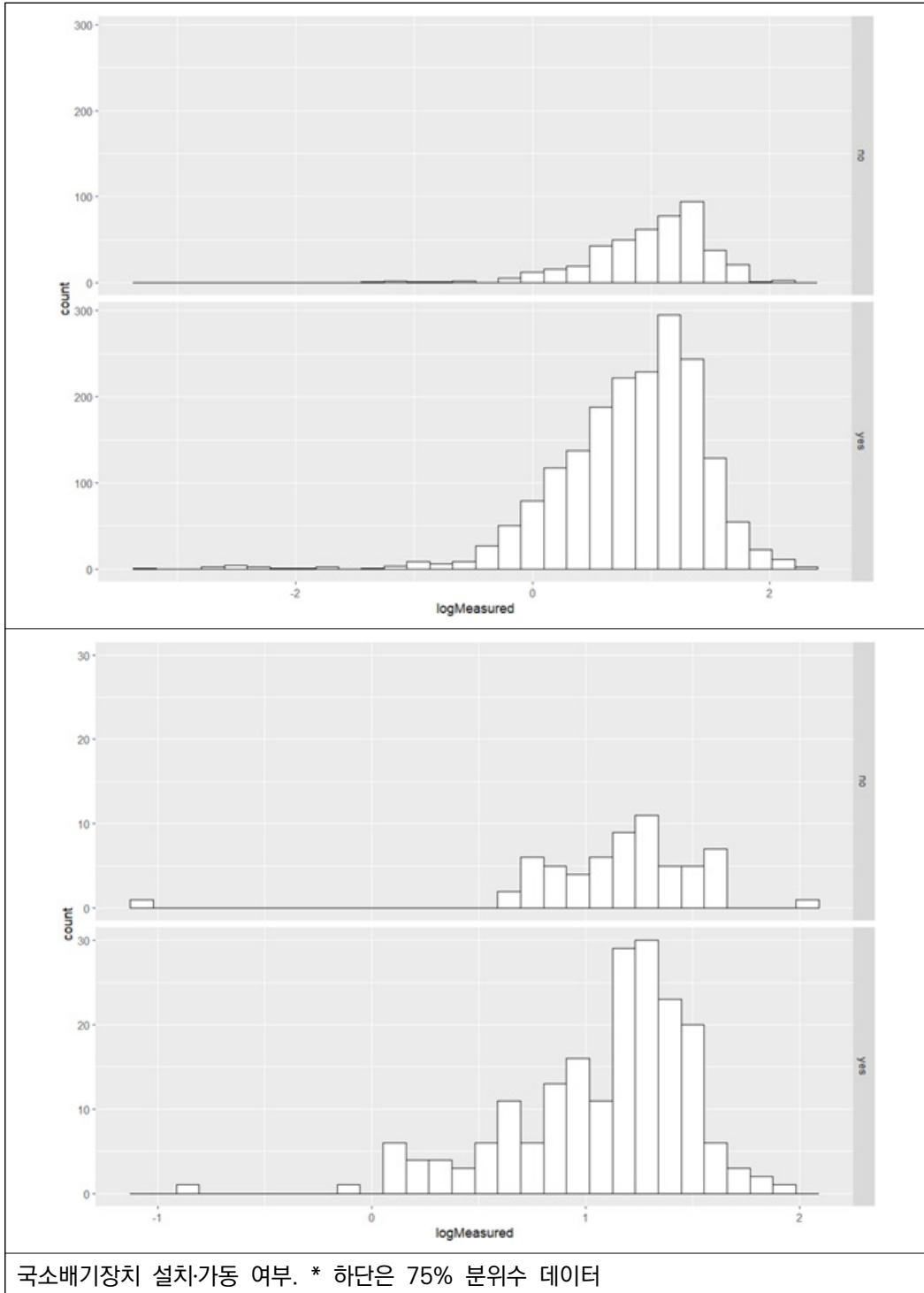




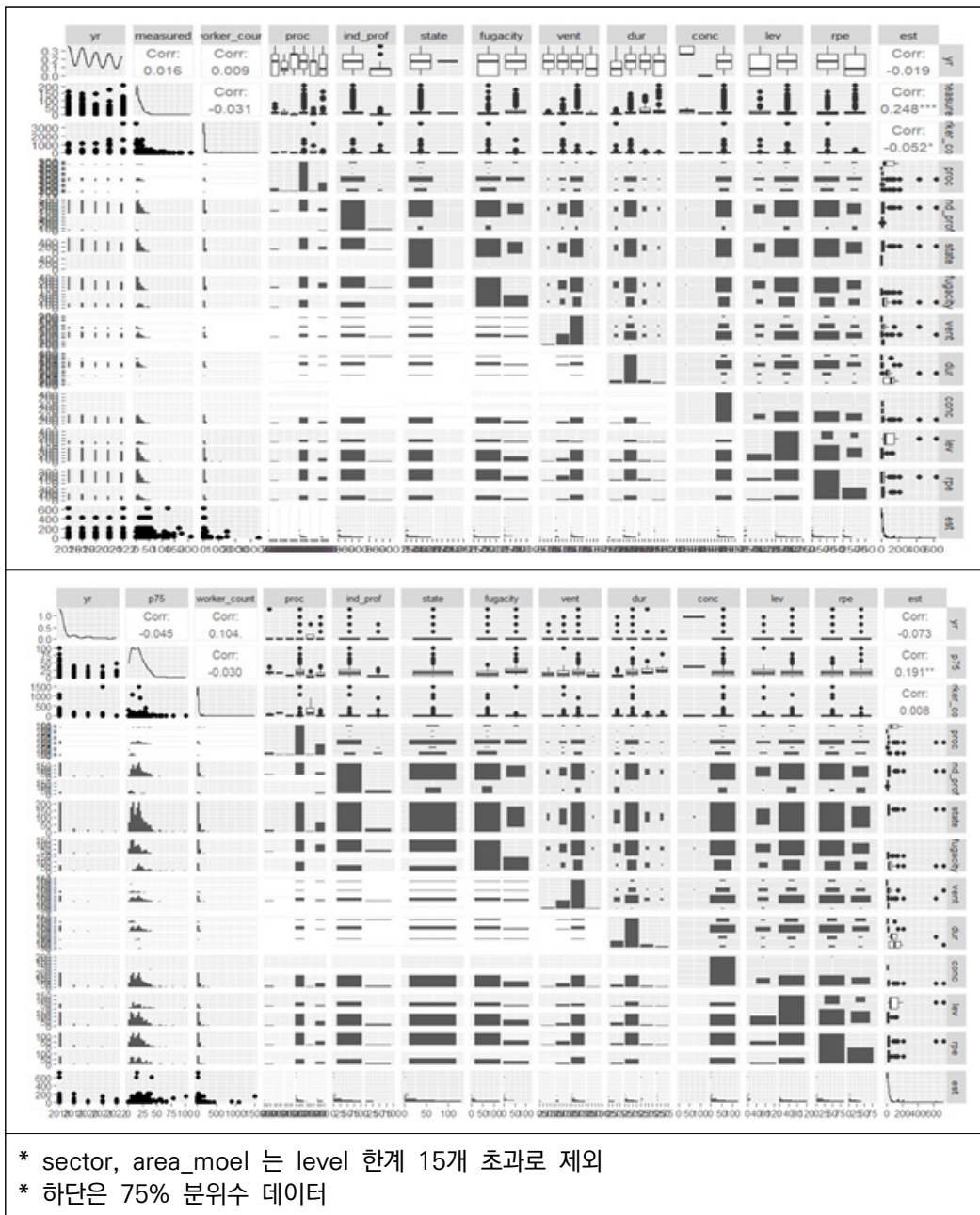




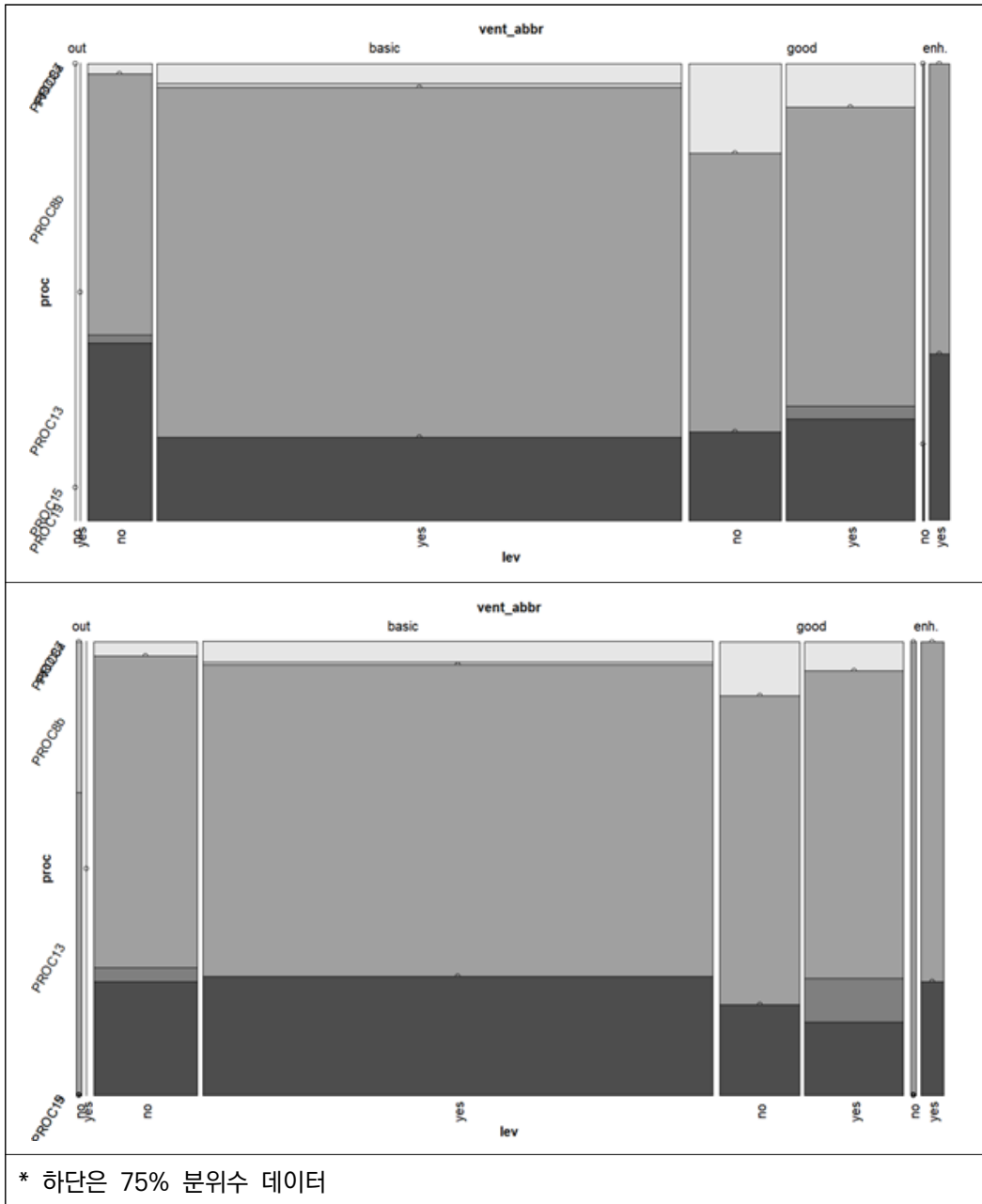




4. 각 변수별 개괄적 상관관계



5. 주요 노출변수에 따른 데이터 구성



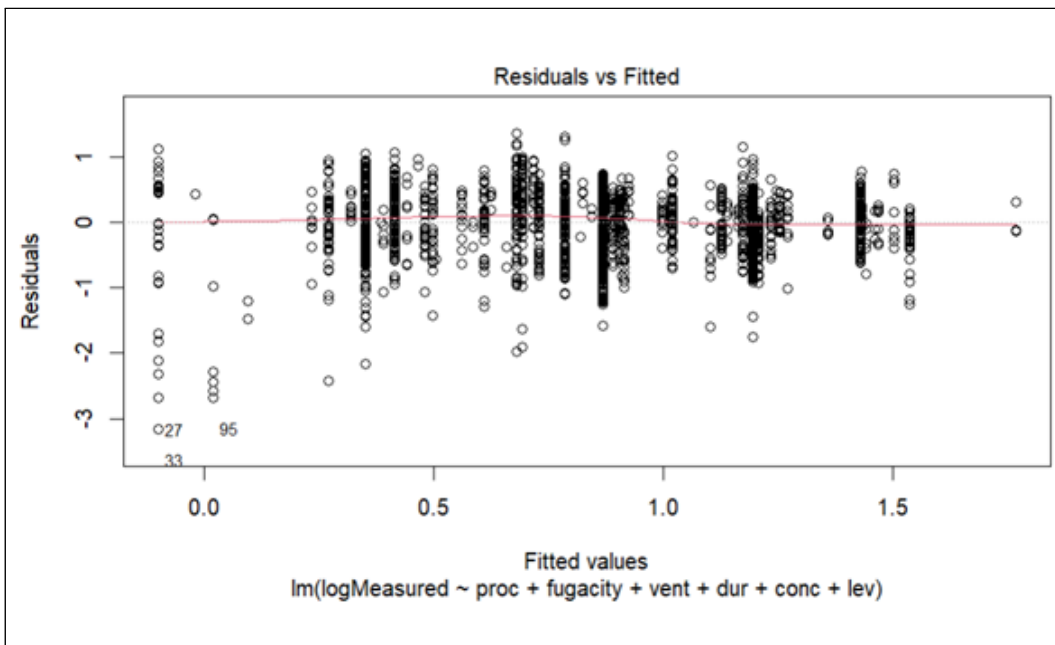
6. 다중 선형회귀분석의 각 회귀식 성능

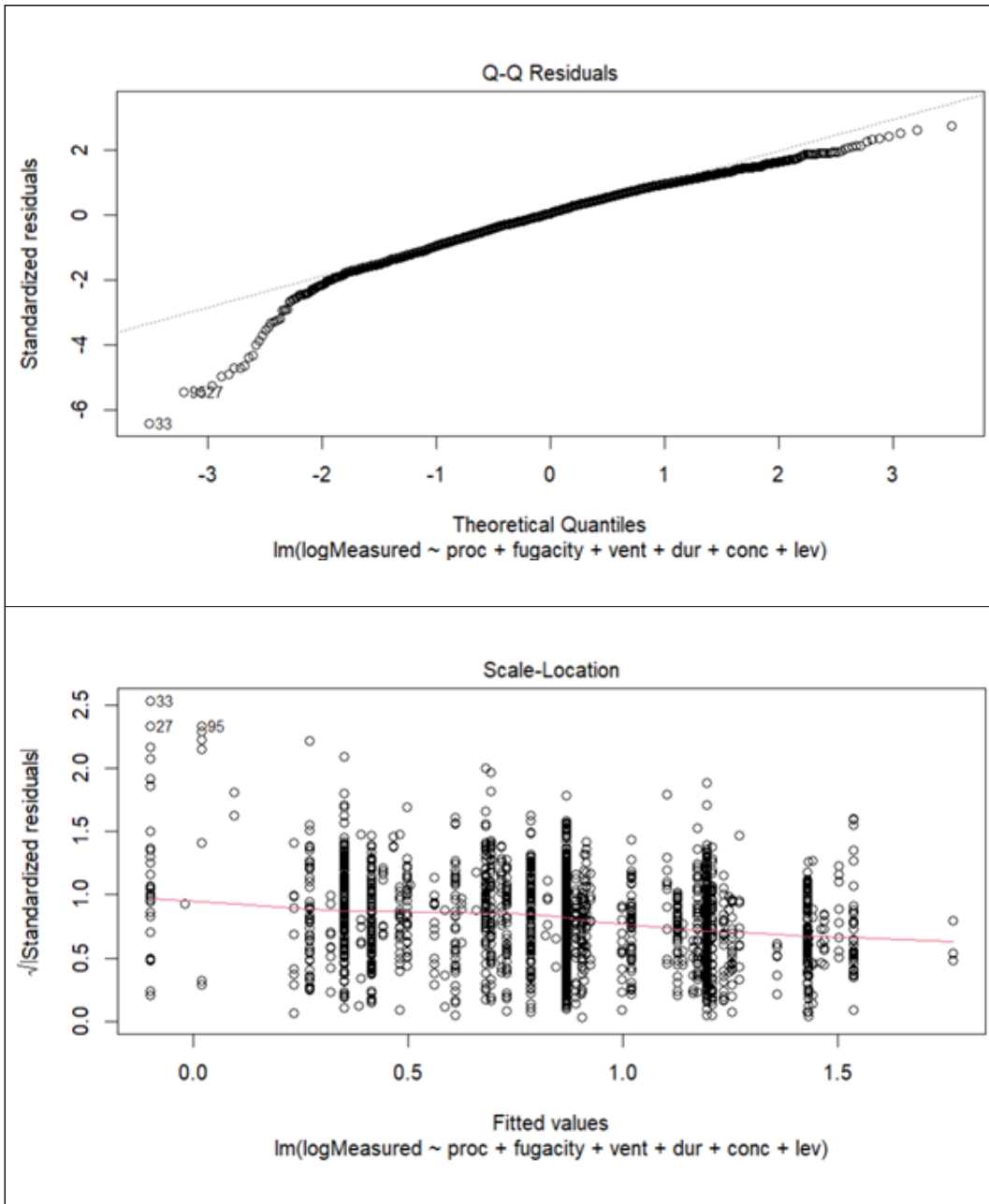
1) 전체 데이터 + ECETOC TRA 변수

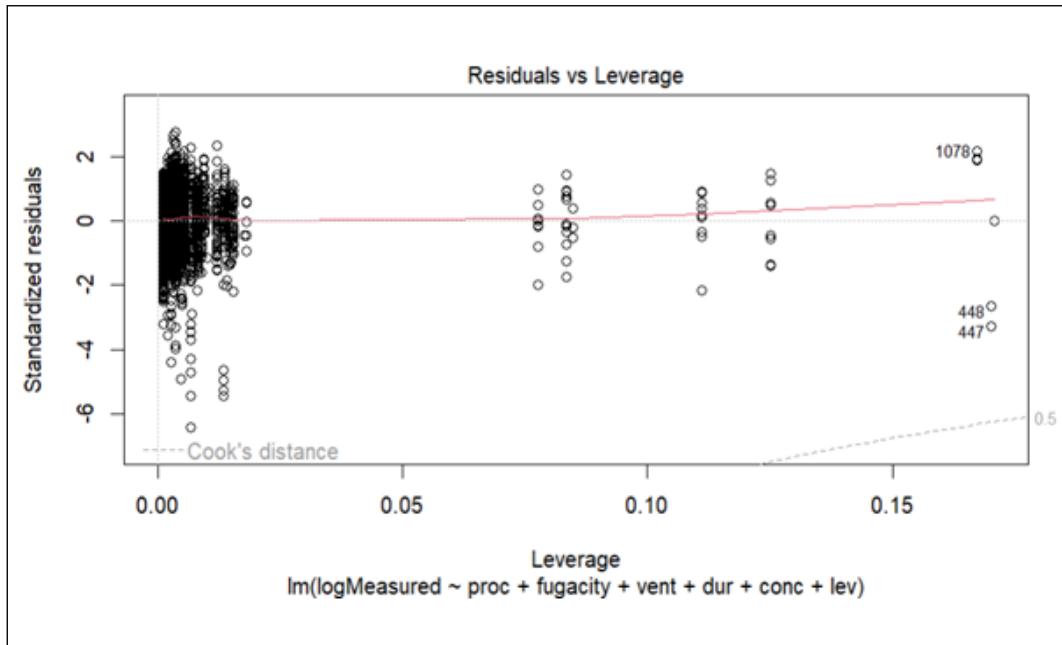
(1) 요약

- $F(15, 2279) = 71.74, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.3163

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.1433

- $p < 0.001$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

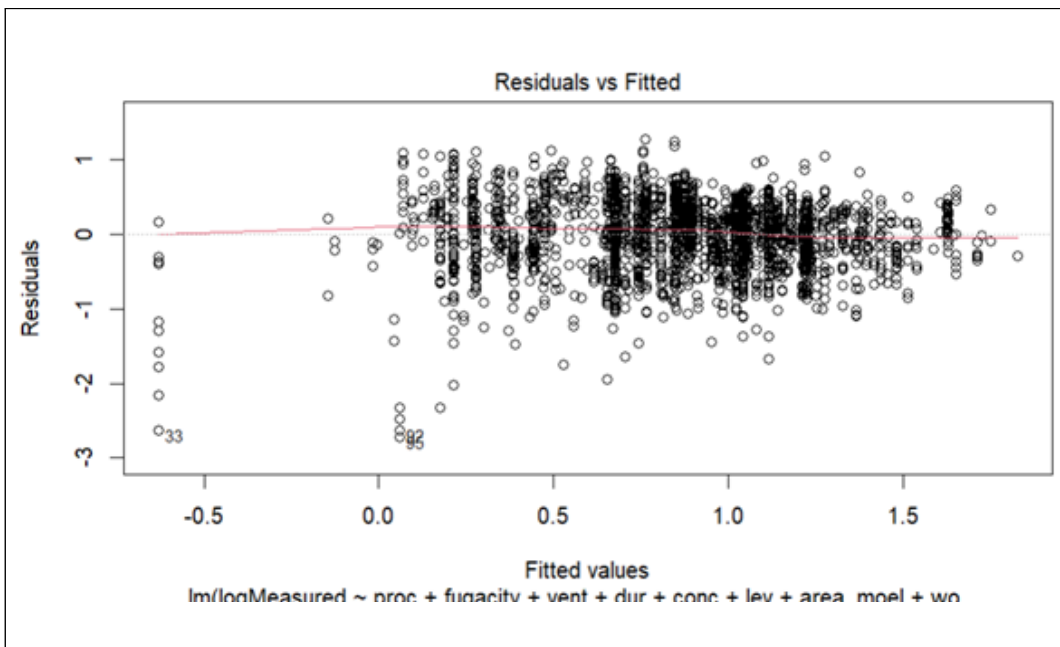
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	3.532458	5	1.134508
fugacity	1.242326	1	1.114597
vent	2.875141	3	1.192458
dur	1.480858	3	1.067625
conc	1.035973	2	1.008874
lev	1.246888	1	1.116641

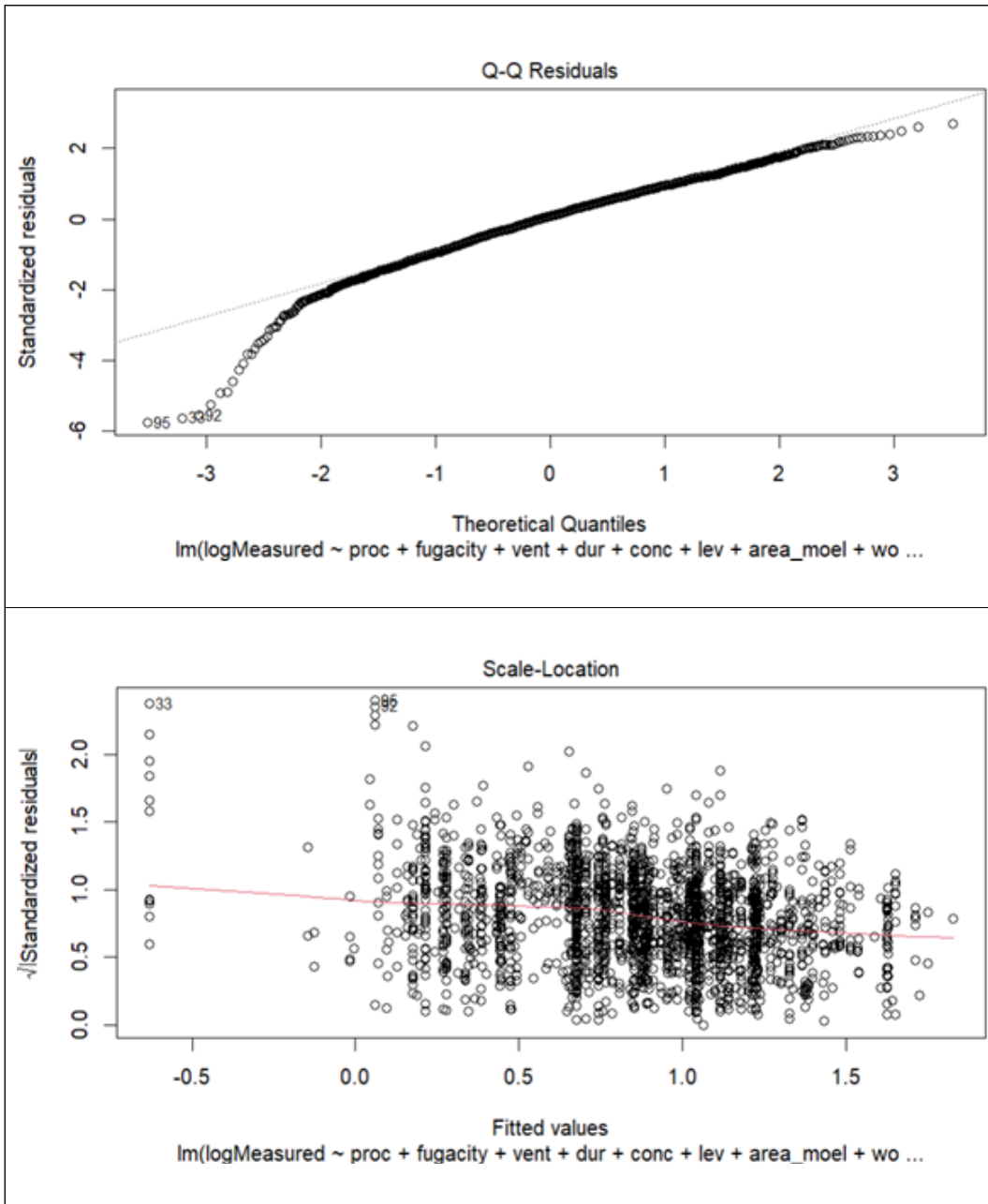
2) 전체 데이터 + ECETOC TRA 변수 및 추가변수

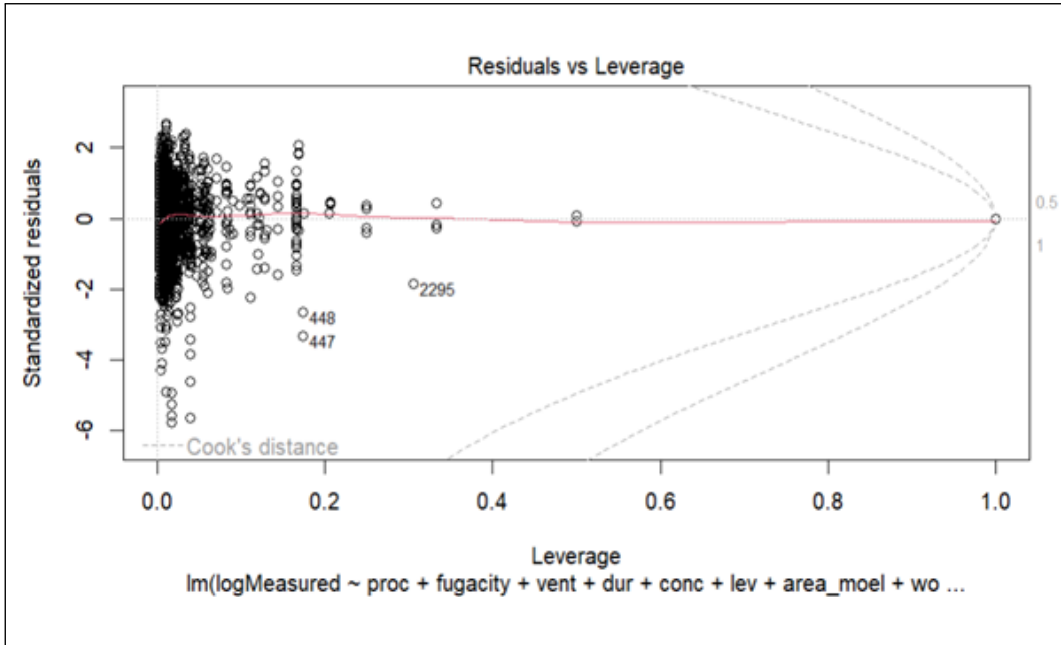
(1) 요약

- $F(48, 2245) = 28.72, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.3672

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.2397

- $p < 0.001$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

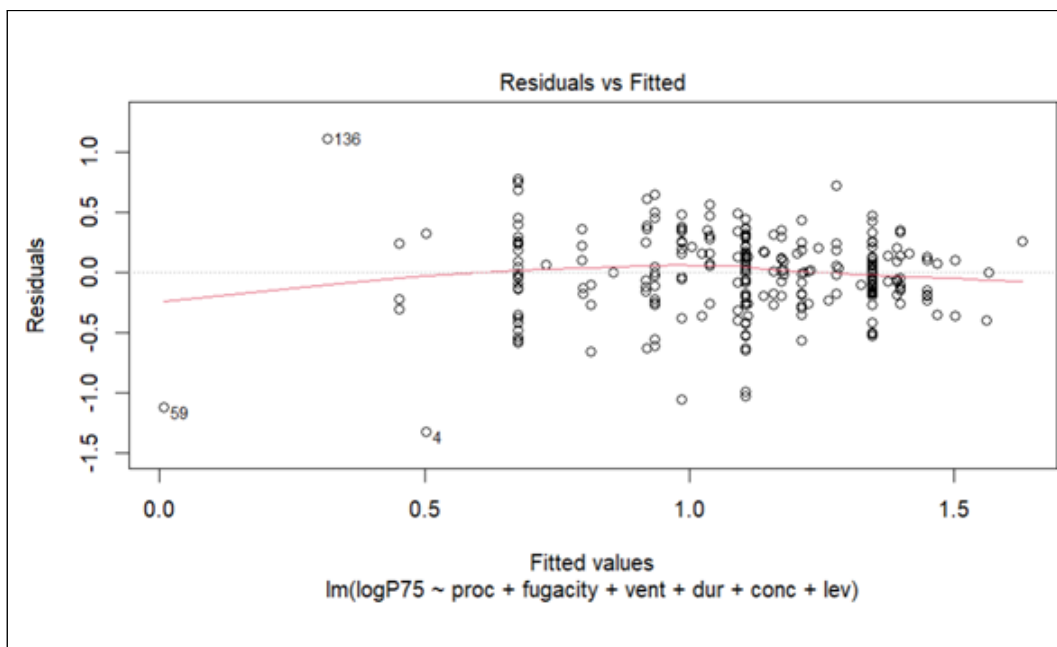
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	8.041382	5	1.23178
fugacity	1.538778	1	1.240475
vent	3.556635	3	1.235492
dur	2.267647	3	1.146206
conc	1.14619	2	1.034699
lev	1.454594	1	1.206065
area_moel	13.23847	31	1.042543
worker_count_g	2.670663	2	1.278365

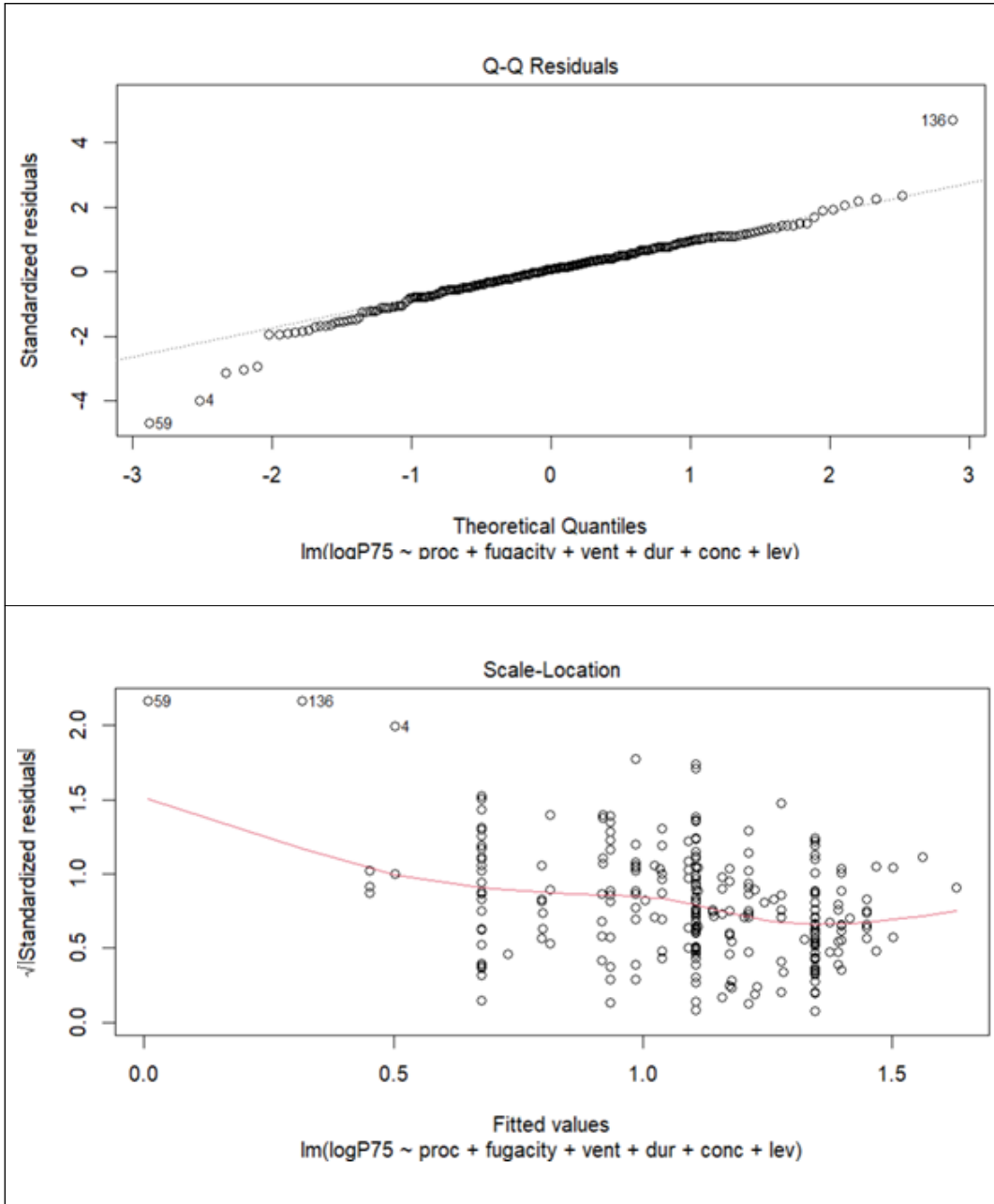
3) 75% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수

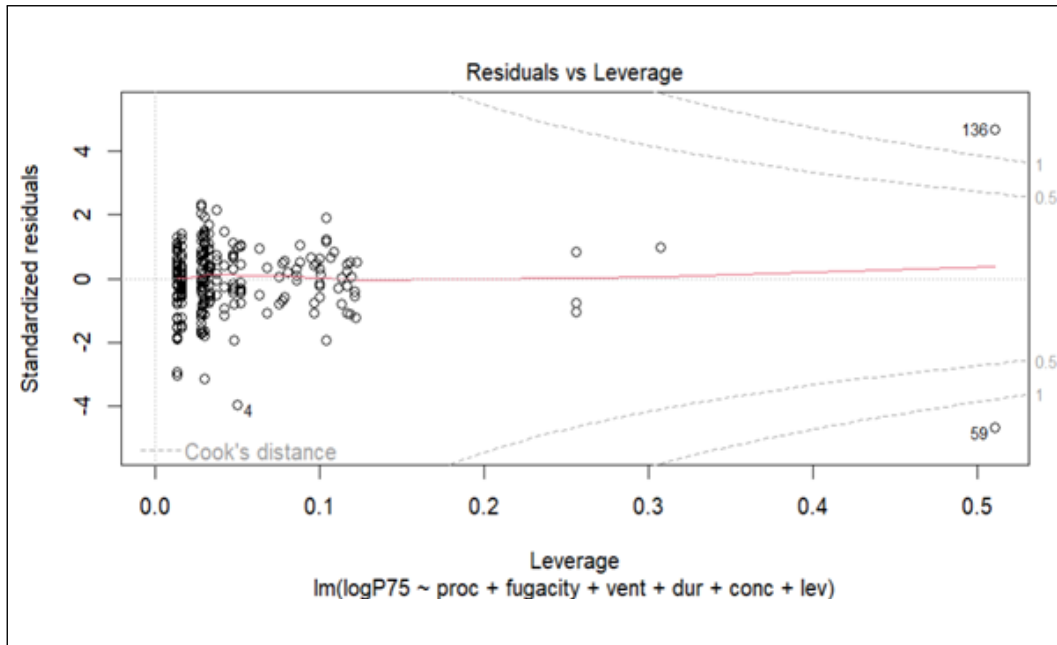
(1) 요약

- $F(14, 243) = 10.4, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.3385

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.9475

- $p = 0.3127$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

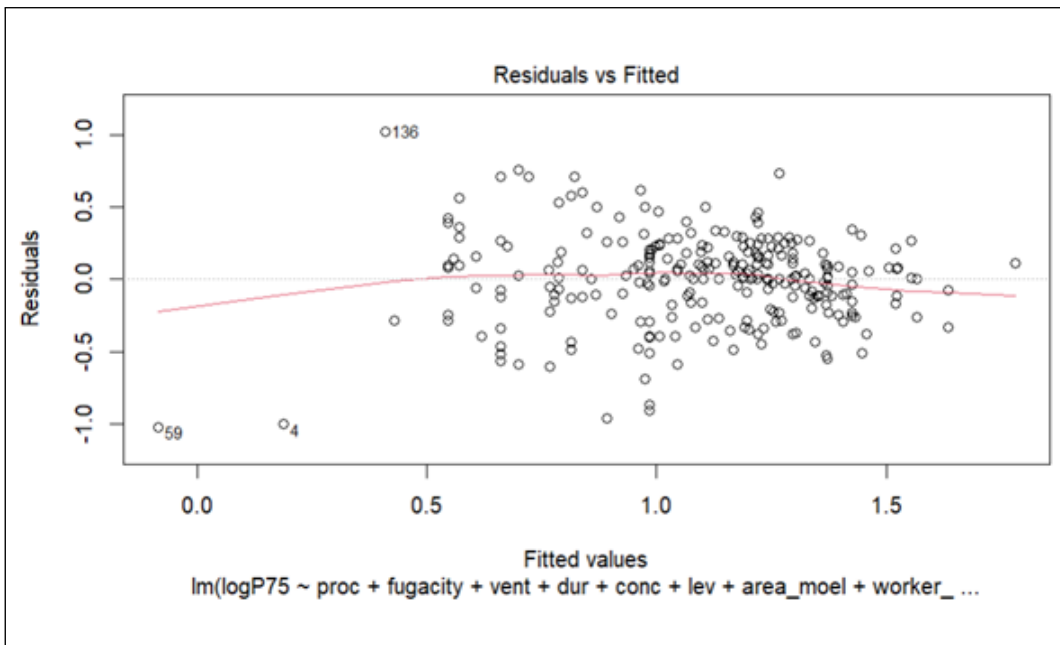
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	2.671807	5	1.103267
fugacity	1.276172	1	1.129678
vent	1.860024	3	1.10897
dur	1.670038	3	1.089234
conc	1.029071	1	1.014431
lev	1.173684	1	1.083367

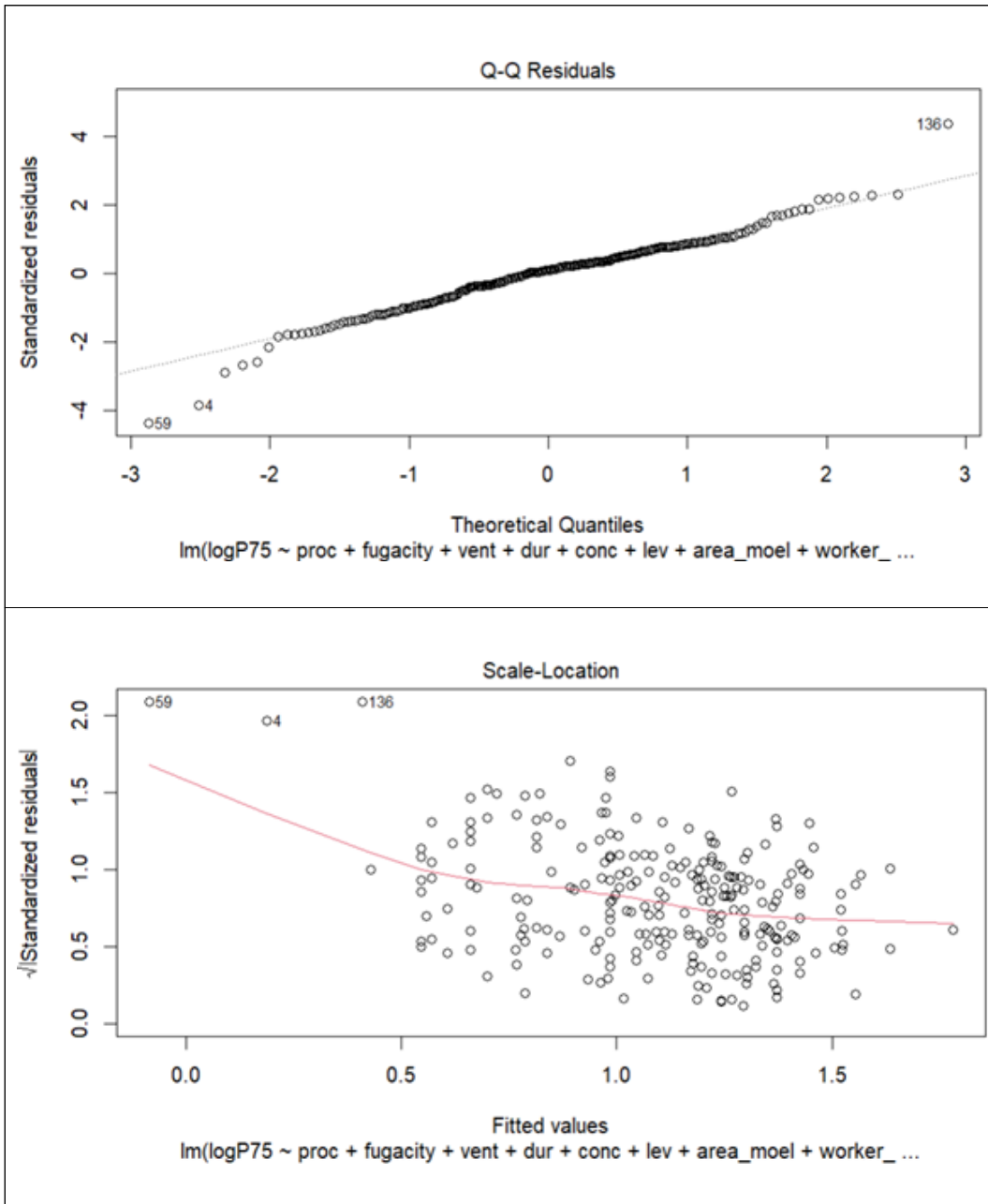
4) 75% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수 및 추가변수

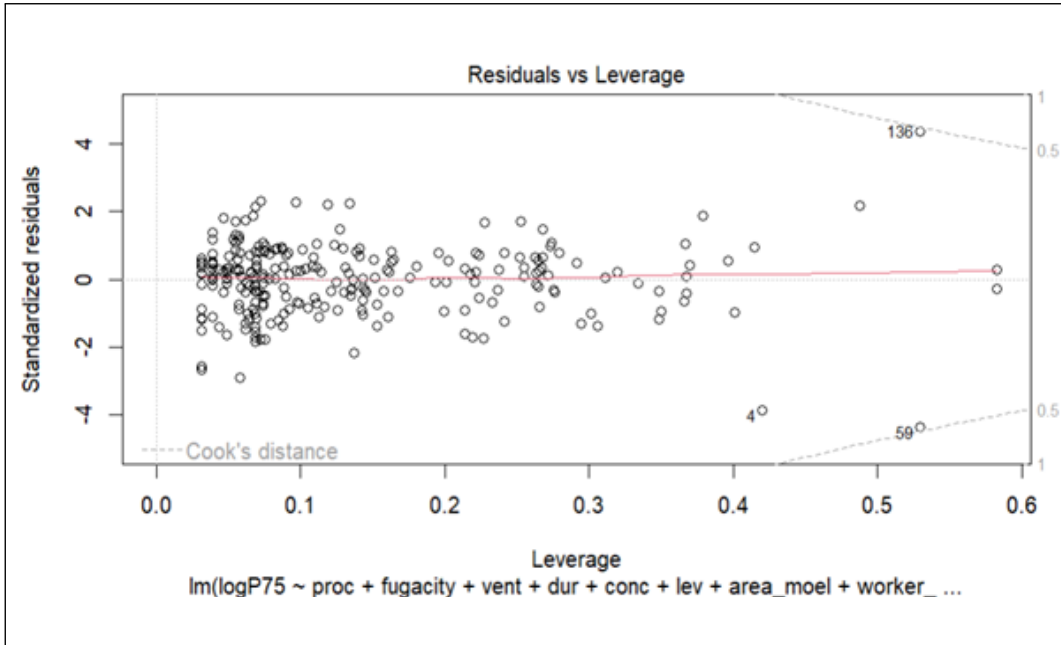
(1) 요약

- $F(44, 213) = 3.889, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.331

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 2.0294

- $p = 0.3675$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

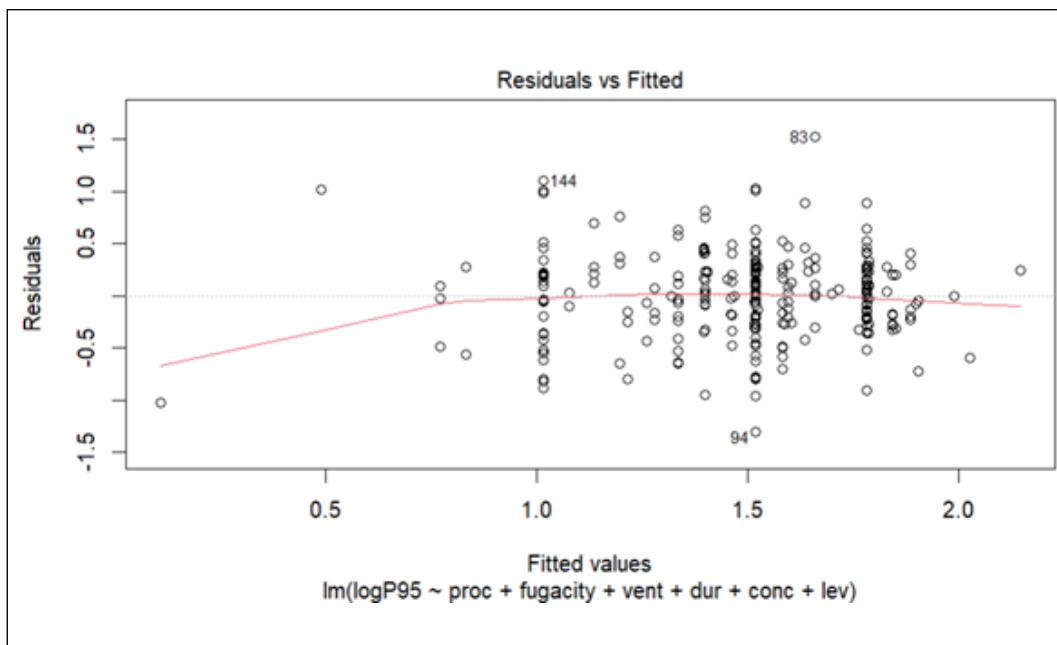
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	6.063179	5	1.197485
fugacity	1.57588	1	1.25534
vent	2.209034	3	1.141214
dur	2.902623	3	1.19435
conc	1.083766	1	1.041041
lev	1.336469	1	1.156057
area_moel	10.42096	28	1.042742
worker_count_g	2.044509	2	1.195769

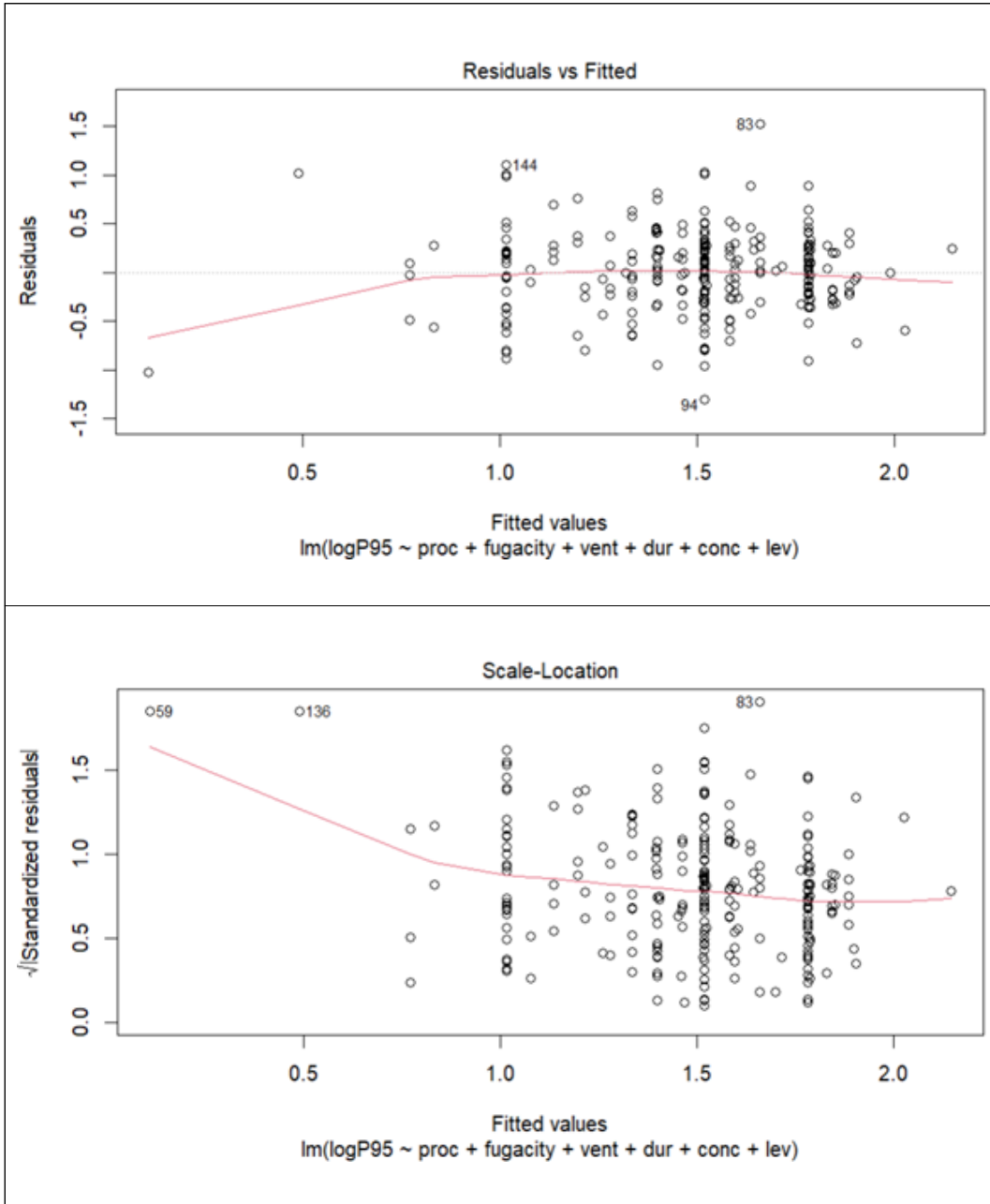
5) 95% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수

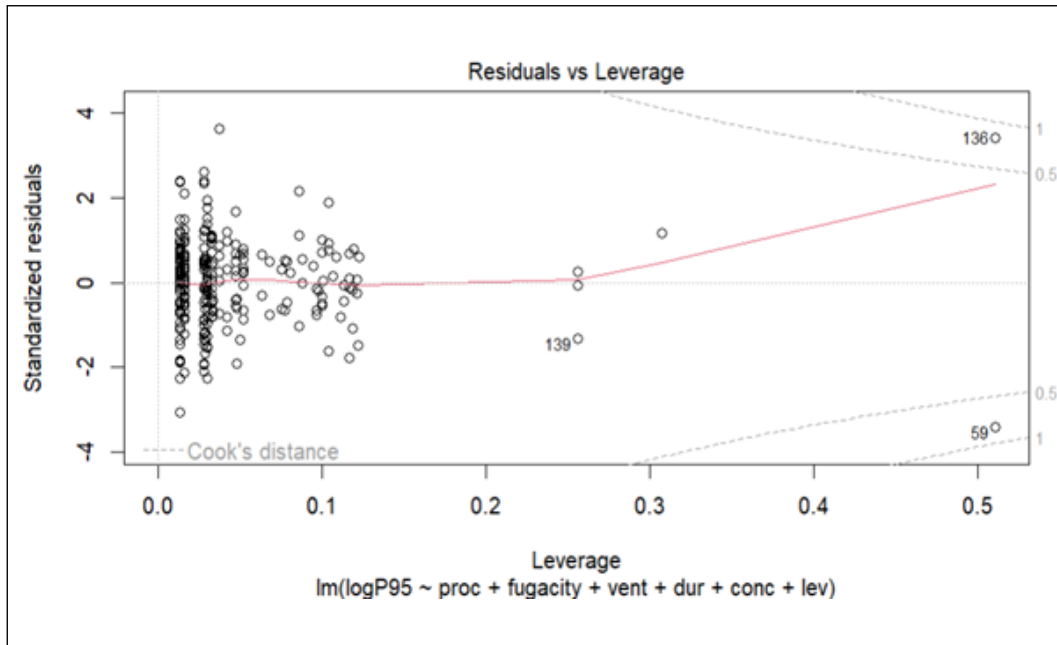
(1) 요약

- $F(14, 243) = 8.575, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.2921

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.9151

- $p = 0.227$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

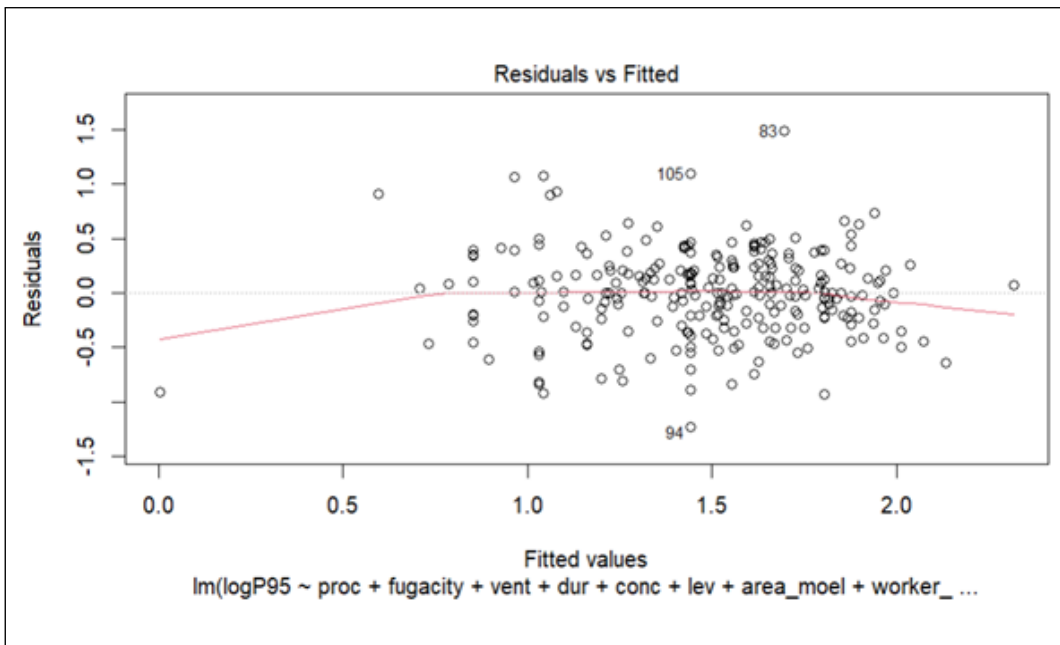
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	2.671807	5	1.103267
fugacity	1.276172	1	1.129678
vent	1.860024	3	1.10897
dur	1.670038	3	1.089234
conc	1.029071	1	1.014431
lev	1.173684	1	1.083367

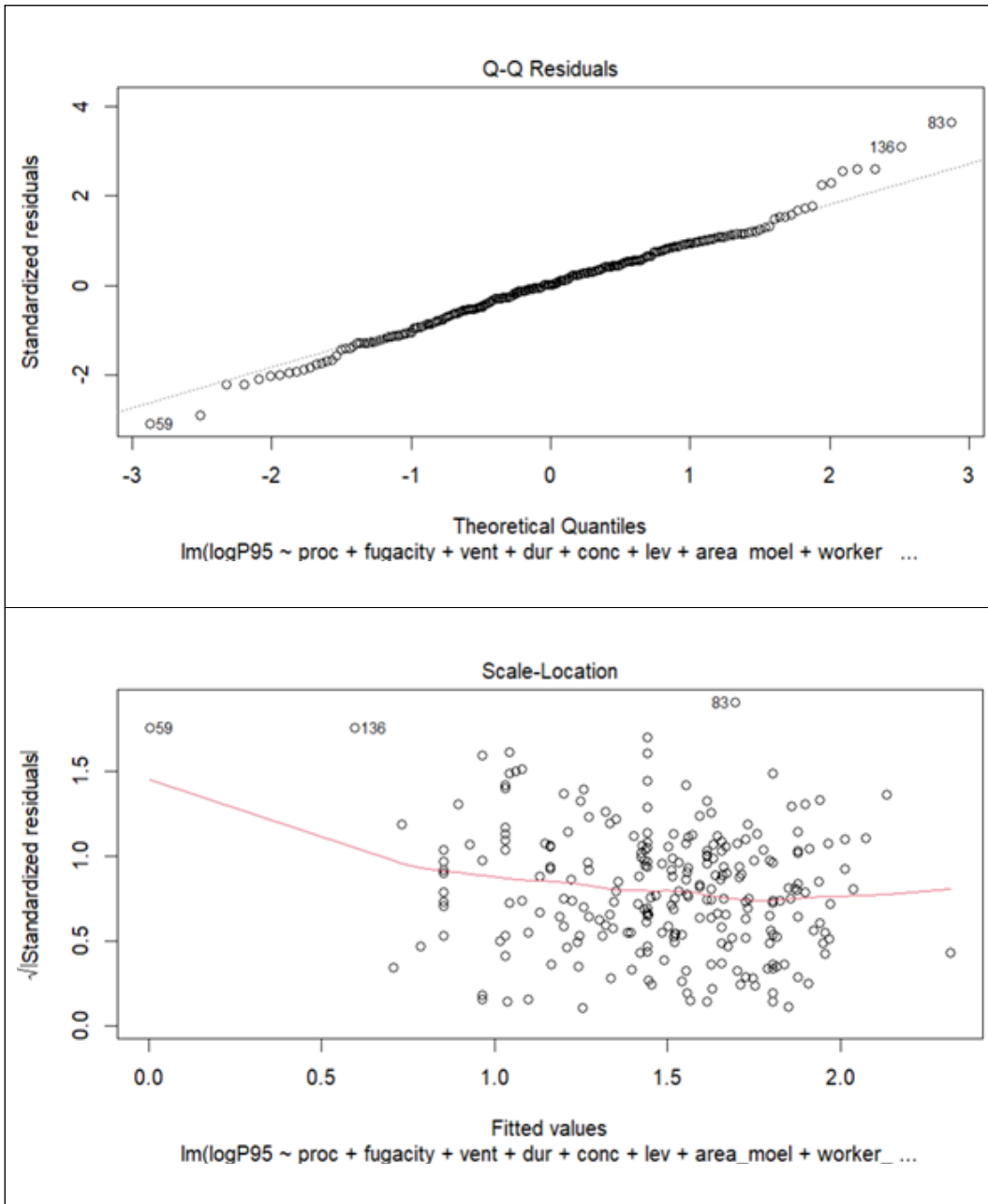
6) 95% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수 및 추가변수

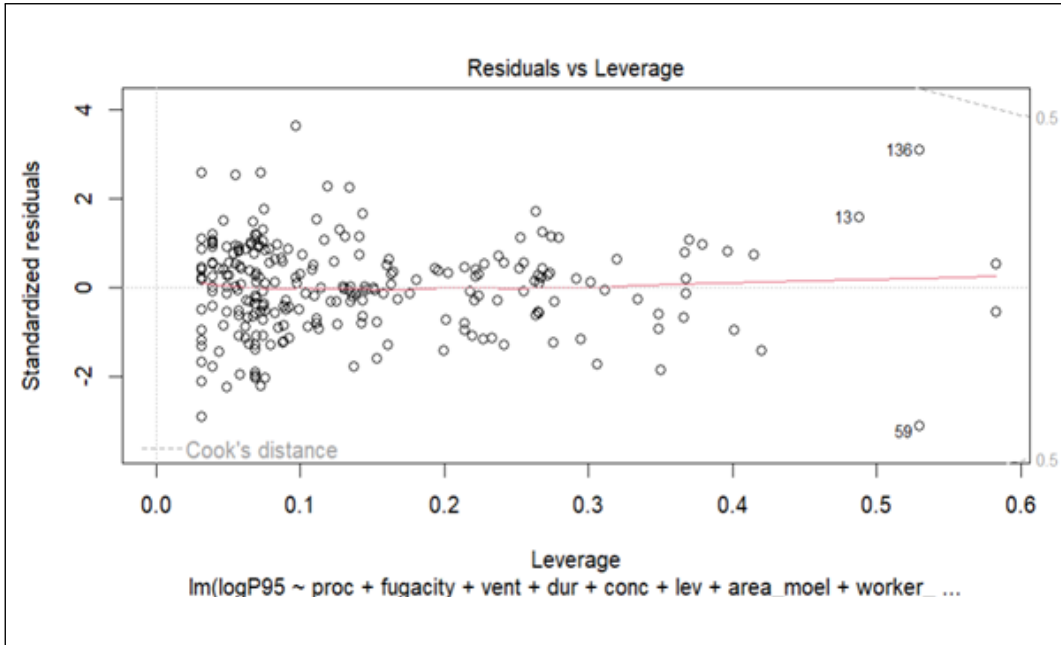
(1) 요약

- $F(44, 213) = 3.301, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.3672

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.9251

- $p = 0.119$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

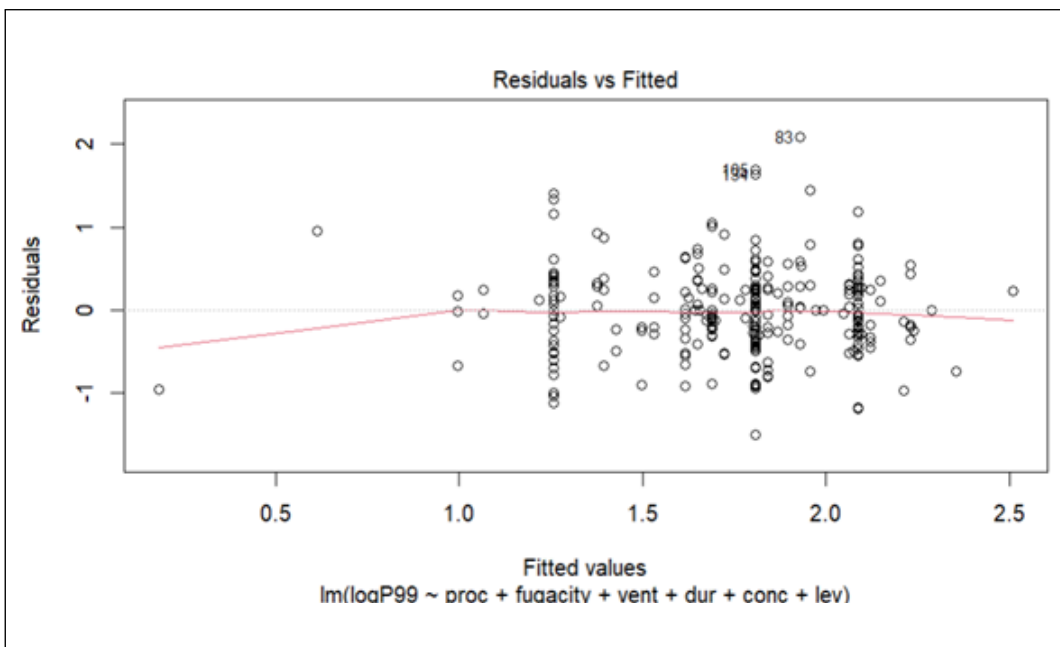
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	6.063179	5	1.197485
fugacity	1.57588	1	1.25534
vent	2.209034	3	1.141214
dur	2.902623	3	1.19435
conc	1.083766	1	1.041041
lev	1.336469	1	1.156057
area_moel	10.42096	28	1.042742
worker_count_g	2.044509	2	1.195769

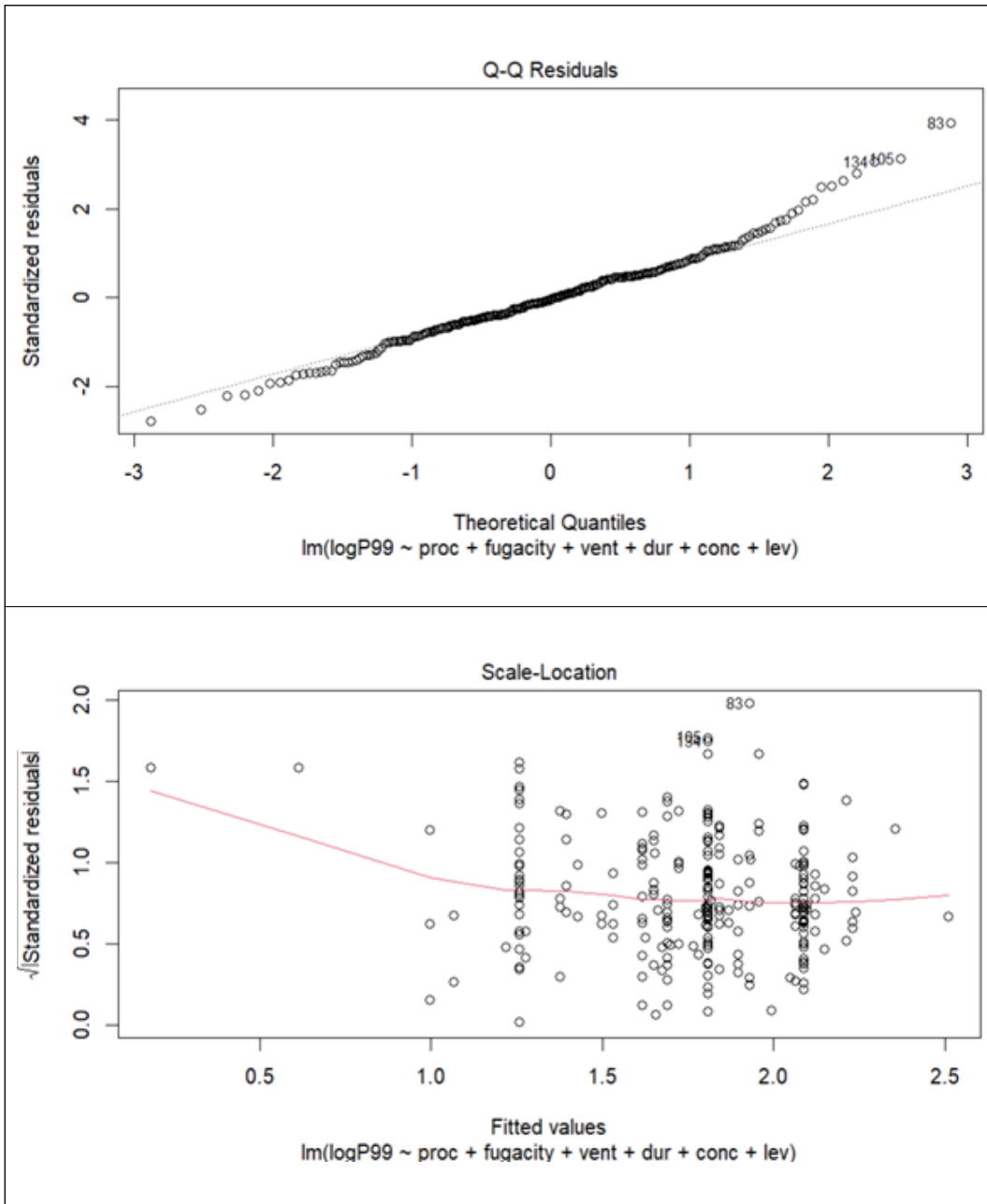
7) 99% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수

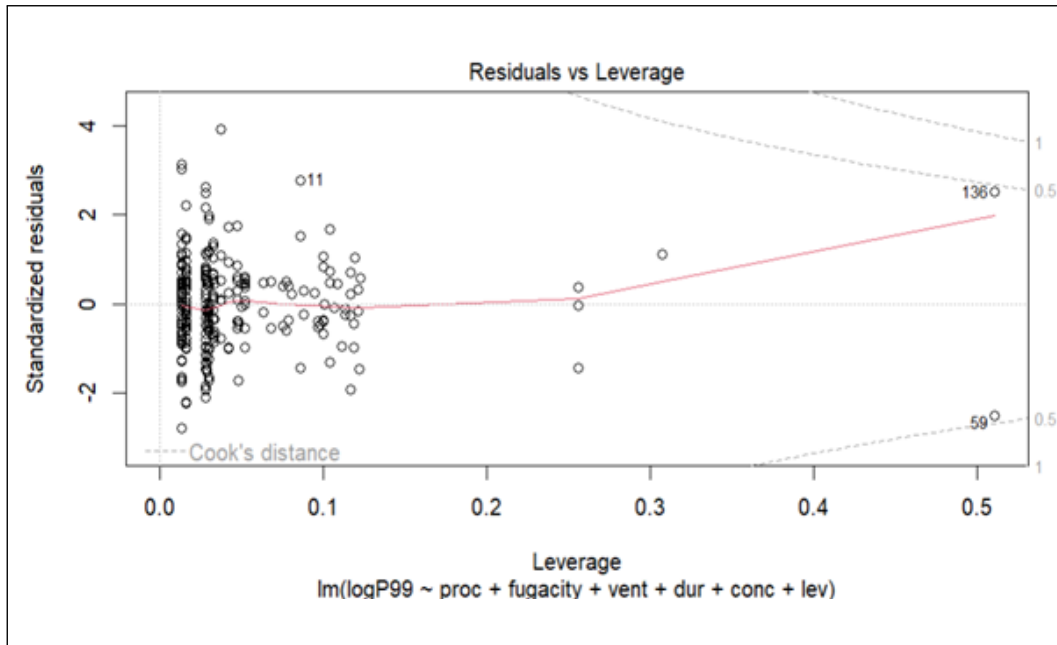
(1) 요약

- $F(14, 243) = 6.473, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.2297

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.8946

- $p = 0.1803$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

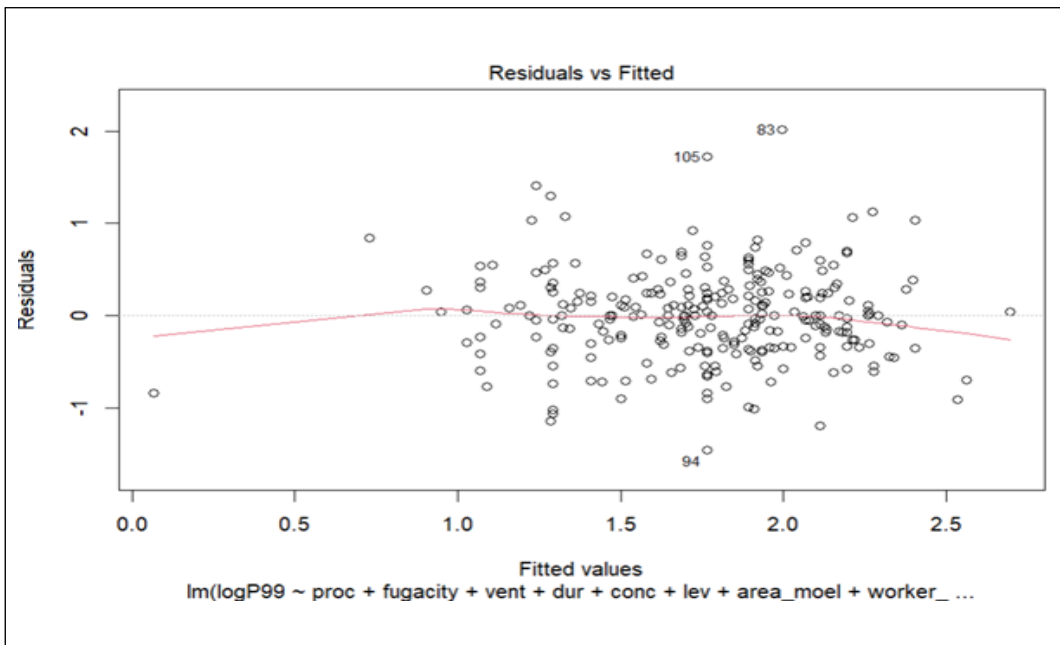
변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	2.671807	5	1.103267
fugacity	1.276172	1	1.129678
vent	1.860024	3	1.10897
dur	1.670038	3	1.089234
conc	1.029071	1	1.014431
lev	1.173684	1	1.083367

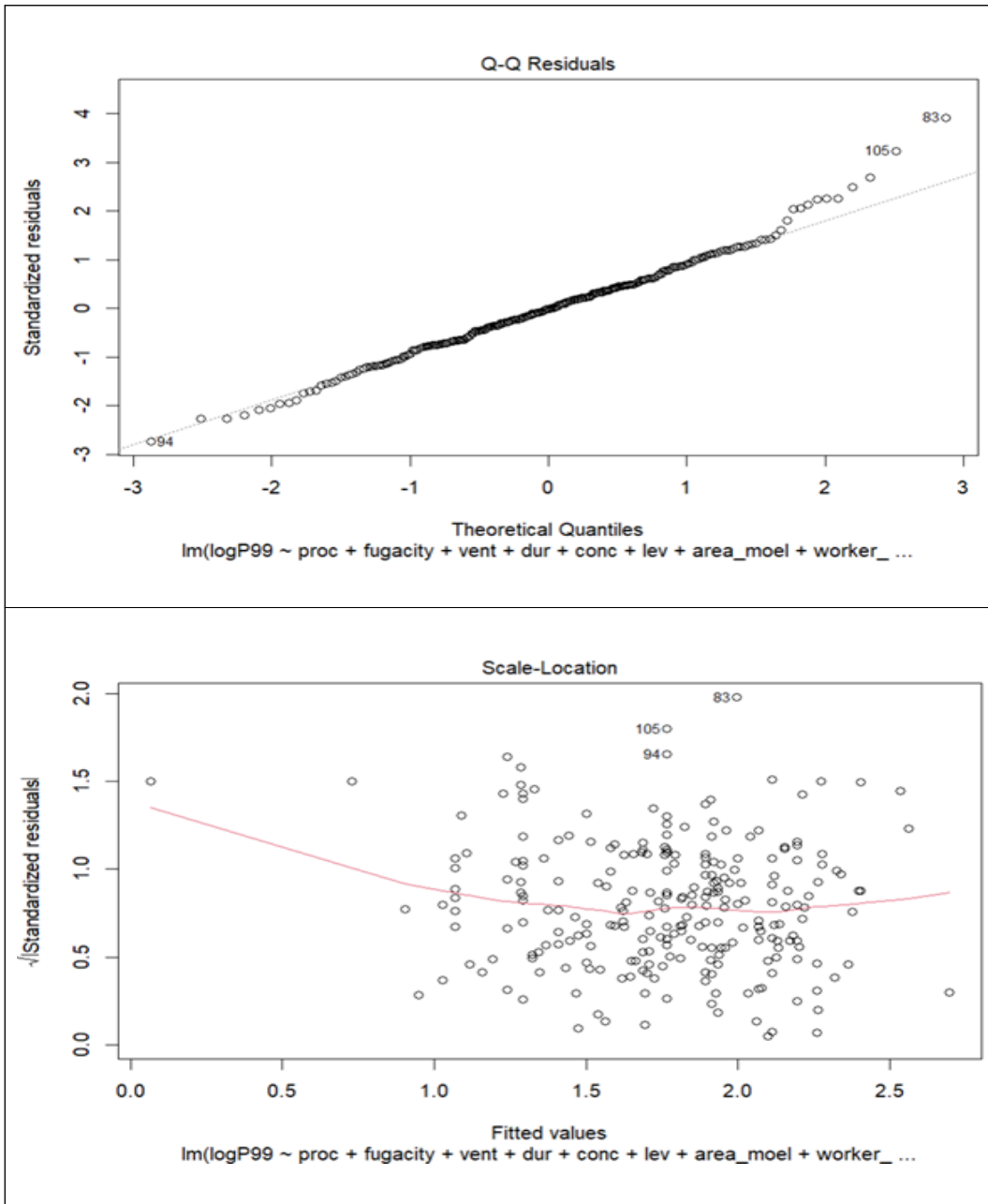
8) 99% 분위수 데이터 + ECETOC TRA 변수 및 추가변수

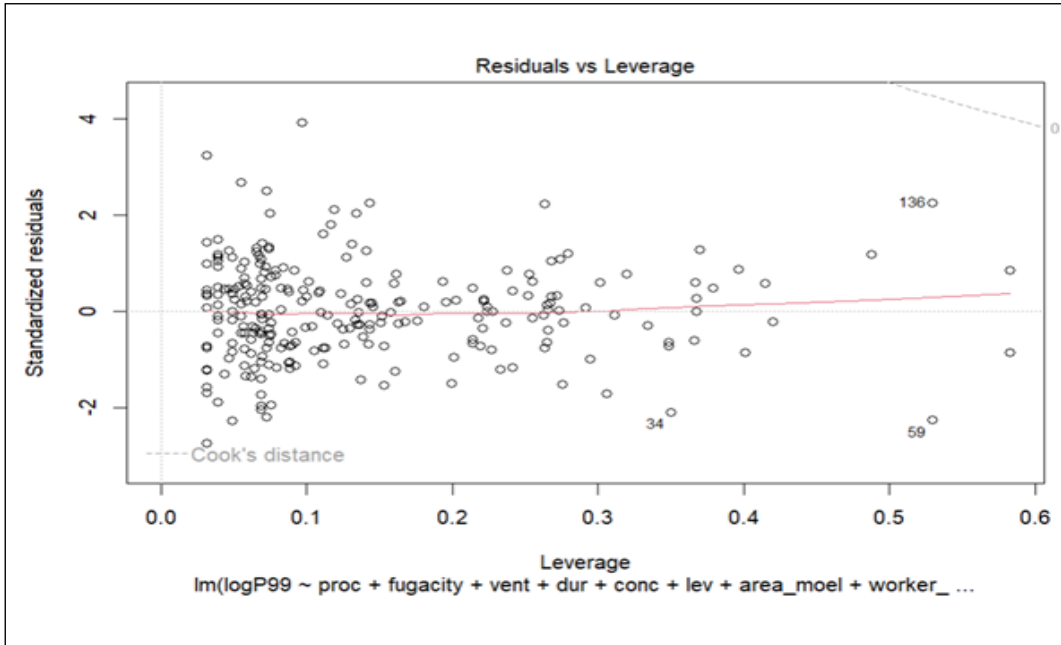
(1) 요약

- $F(44, 213) = 2.747, p < 0.001$
- 조정 결정계수(R^2) : 0.2302

(2) 회귀식 진단 그래프







(3) 잔차의 자기상관 검정. Durbin-Watson 검정

- DW = 1.8881

- $p = 0.06962$

(4) 독립변수의 자기상관 검정: 다중공선성

변수	GVIF	Df	GVIF ^{1/(2*Df)}
proc	6.063179	5	1.197485
fugacity	1.57588	1	1.25534
vent	2.209034	3	1.141214
dur	2.902623	3	1.19435
conc	1.083766	1	1.041041
lev	1.336469	1	1.156057
area_moel	10.42096	28	1.042742
worker_count_g	2.044509	2	1.195769

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 조지훈 (연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 박현희 (선임연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 장미연 (과장, 직업환경연구실)

연구원 : 김수진 (대리, 직업환경연구실)

연구기간

2024. 02. ~ 2024. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

**노출량 추정방식을 활용한 유해인자의
정량적 위험성 평가 기반기술 연구**

- TCE 작업환경측정결과를 통한 ECETOC TRA 평가 -
(2024-산업안전보건연구원-689)

발 행 일 : 2024년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 박승현

연구책임자 : 직업환경연구실 연구위원 조지훈

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400

전 화 : 052-703-0884

팩 스 : 052-703-0337

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-94453-37-6

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체