

유기합성실험실 연구자의 단위작업별 노출 평가

최영은 · 추연희 · 이익모¹ · 박정임*

순천향대학교 환경보건학과, ¹인하대학교 화학과

Task-based Exposure Assessment among Laboratory workers in Organic Synthesis Laboratories

Youngeun Choi · Yeonhee Chu · Ikmo Lee¹ · Jeongim Park*

Department of Environmental Health Sciences, Soonchunhyang University

¹Department of Chemistry, Inha University

ABSTRACT

Objective: Significant concerns have been raised over chemical exposure and potential health risks such as increased cancer mortality among laboratory workers. The aim of this study was to investigate the overall exposure and unit task exposure levels of researchers in organic synthesis laboratories at universities.

Methods: Seventy-seven personal Time-weighted average(TWA) samples and 139 task-based samples from four organic synthesis laboratories at two universities were collected over three days. The concentrations of acetone, chloroform, dichloromethane(DCM), diethyl ether, ethyl acetate, n-hexane, tetrahydrofuran(THF), benzene, toluene, and xylene were determined using the GC-FID.

Results: The most frequently used chemicals in the laboratories were acetone, DCM, n-hexane, methanol, and THF. Carcinogens such as benzene, chloroform, and DCM were used in one or more laboratories. The TWA full-shift exposures of researchers to acetone was the highest(ND-59.3 ppm). Benzene was observed above the occupational exposure limit in 18-40% of the samples. The levels of exposure to organic solvents were statistically different by task($p < 0.05$), while washing task was the highest. Washing was not perceived as a part of the real lab tasks. Rather it was considered as simple dish-washing or experimental preparation and performed in an open sink where exposure to organic solvents was unavoidable. TWAs and task-based concentrations were compared by substance, which suggests that TWA-based assessment could not reflect short-term and high concentration exposures.

Conclusions: Laboratory workers may be exposed to various organic solvents at levels of concern. TWA-based measurement alone cannot guarantee holistic exposure assessment among lab workers as their exposures are very dependent on their tasks. Further investigation and characterization for specific tasks and overall chronic exposures will help protect lab workers from unnecessary exposure to chemicals while they perform research.

Key words: exposure assessment, laboratory workers, organic solvents, task-based, TWA

I. 서 론

이공계 연구실험실에는 화학적, 생물학적, 물리적 유해요인 등 매우 다양한 위험 요소가 있다. 그 중에서도 실험실에서 사용되는 물질의 경우 그 위해성이

알려진 물질에서부터 알려지지 않은 물질까지 여러 가지 종류가 취급되고 있기 때문에 연구자가 다양한 경로를 통해 수시로 유해물질에 노출될 가능성이 높다(Kretchman et al., 2002).

유해화학물질에 장기간 노출될 경우 만성적인 건강

*Corresponding author: Jeongim Park, Tel: 041-530-1269, E-mail: jeongim69@gmail.com

Department of Environmental Health Sciences, Soonchunhyang University, 22, Soonchunhyang-ro, Asan-si, Chungnam 31538

Received: February 21, 2019, Revised: March 4, 2019, Accepted: March 6, 2019

 Youngeun Choi <http://orcid.org/0000-0002-5579-0703>

 Yeonhee Chu <http://orcid.org/0000-0002-6724-3977>

 Ikmo Lee <http://orcid.org/0000-0002-7283-2696>

 Jeongim Park <https://orcid.org/0000-0002-5851-1183>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

장해를 일으킬 수 있는데, 화학물질을 사용하는 연구자의 건강영향으로는 발암성과 생식독성이 주로 연구되었다. 실험실 업무와 발암성과의 관계 연구에서 여러 가지 요인들과의 상관성들이 밝혀져 왔다. 림프 및 조혈계통 암, 췌장암, 유방암, 위장관암, 뇌암 등과 같이 다양한 암의 발병과 사망 위험이 높게 나타났다(Olin, 1976; Walrath et al., 1985; Carpenter et al., 1991; Kauppinene et al., 2003; Kubale et al., 2008). 생식독성의 경우 자연유산 및 태아 기형 등의 상관관계가 보고되었고(Meirik et al., 1979; Wennborg et al., 2001; Halliday-Bell et al., 2010), 특히 Axelsson et al.(1984)은 유기용제를 취급하는 실험실 연구자의 자연유산의 확률이 높게 나타난다고 보고하였다. 이러한 발암성과 생식독성 등 건강영향에 대한 연구들은 후향적으로 이루어져 과거 화학물질의 노출정도나 그 특성을 파악하기 어렵고, 주로 대상자들의 기억에 의존한다는 점과 노출에 따른 양·반응 관계의 추론이 쉽지 않다는 점을 공통적인 제한점으로 말하고 있다. 우리나라에서도 실험실 연구자들의 화학물질 노출과 건강영향에 관한 우려가 제기되었으나, 그들의 노출 정도와 특성에 관한 연구는 매우 제한적이다. 연구자들의 화학물질 노출에 대한 기본적인 데이터가 거의 없어 건강영향과의 연관성을 밝히기에는 매우 부족하다(Byun et al., 2010; 2011).

연구실험실에서 유해화학물질 노출은 일반 제조업 사업장과는 구분되어 진다. 일반 제조업 사업장에 비하여 개별 화학물질의 사용량이 적고, 사용빈도와 주기가 예측하기 어려울 정도로 불규칙적이다. 하루 여덟 시간 규칙적으로 일어나는 작업은 거의 없고, 연구실에 머무르는 시간도 하루에 1~2시간에서 24시간까지 매우 다양하다. 또한 실험에 필요한 작업(task)의 내용을 일반화시키기 어렵고, 작업의 내용과 구성도 수시로 변한다. 일반 제조업 사업장 작업환경측정에 적용되는 유사노출그룹(similar exposure groups, SEGs)의 파악은 개별적인 연구 과제 수행이 보편적인 연구실험실에서는 의미가 없는 시도이다. 하지만 협소한 공간에서 연구가 이루어지는 경우 연구자가 직접 다루지 않는 유해물질일지라도 심각하게 노출될 개연성은 있다. 일반 제조업 사업장과 비교할 때, 사용하는 화학물질의 종류가 많고, 작업 내용이 빈번히 달라지므로 실험실 연구자의 노출 평가는 작업장 노출평가의 일반적인 전략으로는 제한적일 수밖에 없다.

이러한 어려움에도 불구하고 수행된 몇몇 사례들을 보면 시간가중치 측정 연구와 단위작업별 측정 연구들이 있다. Kim et al.(1998)은 유기용제를 사용하는 대학 실험실의 전 작업시간(full-shift) 지역시료와 개인시료 중 농도를 평가하였다. Tan et al.(1999)은 MIT 대학의 수업용 실험실과 연구용 실험실의 최악의 조건(worst case condition)에서 학생들을 대상으로 노출 평가를 하였다. Yoo et al.(2000)은 일부 산업보건관련 기관의 분석실험실에서 전작업시간 동안 유기용제를 측정하였다. Ha et al.(2010)은 정부출연연구기관과 대학교 실험실에서 휘발성유기용제(Volatile Organic Compounds, VOCs), 석면, CO₂, PM₁₀을 대상으로 8시간 동안 실험실 환경의 시간가중노출평균농도(Time-weighted average, TWA)를 평가하고 직독식기기를 이용하여 모니터링 하였다. Byun et al.(2011)은 화학물질을 합성하거나 분석하는 실험실에서 VOCs를 대상으로 지역과 개인 시료 모두를 측정하였다. 지역시료는 TWA 농도를 평가하고 직독식기기를 이용하여 실시간 모니터링을 하였다. 개인 시료는 8시간 TWA와 작업별 단시간 노출로 나누어 평가하였다. 대부분의 선행연구는 실험실 환경의 평균적인 농도 수준을 평가하는 것에 그쳐, 실험실 환경 중 노출의 특성을 파악하기에는 부족하였다. 실험실의 경우 연구자가 장시간 지속적으로 노출이 되는 것이 아니라 실험 작업을 할 때 단시간 집중적으로 노출이 되므로 시간가중치 평가로는 노출에 따른 위험을 과소평가할 우려가 있다(Byun et al., 2011). 그렇기 때문에 실험실 노출 평가는 작업 중심(task-based)으로 이루어지는 것이 바람직해보이나 구체적인 연구는 제한적으로 이루어지고 있다. 또한 수행하는 연구과제에 따라 작업의 내용과 구성이 수시로 변하는 실험실의 특성상 매번 노출 평가를 하는 것은 쉬운 일이 아니며, 작업 중심의 노출 평가가 이루어지고 있다하더라도 이처럼 다양한 노출을 포함하기란 현실적으로 매우 제한적일 수밖에 없다.

본 연구는 화학물질 사용이 빈번한 유기합성실험실 연구자들의 전반적인 노출 정도와 단위작업별 노출 특성을 파악하고자 하였다. 향후 실험실 연구자의 화학물질 노출 수준과 특성을 예측하는 데에 기초자료로 활용함으로써 화학물질 노출에 따른 건강위험을 최소화하는데 기여할 수 있을 것이다.

II. 대상 및 방법

1. 대상 선정 및 예비조사

본 연구는 2012년 1월부터 2월까지 화학물질을 합성하거나 분석하는 서울 및 경기 지역 소재 종합대학교 2곳의 유기합성실험실 4개소를 대상으로 하였다. 본 조사에 앞서 예비조사를 통해 주로 수행하고 있는 실험, 주요 사용물질의 종류 및 양, 실험에 참여하는 인원 및 시간 등 일반적인 특성을 파악하였다. 대상 실험실에서 주로 수행하는 실험 작업과 시중에 판매되고 있는 유기화학 및 합성 실험서(Jeong et al., 2003; Park, 2011)를 참고로 대상 단위작업을 선정하였고, 세척(washing), 여과(filtration), 반응 및 합성(reaction and synthesis), 재결정(recrystallization), 증류(distillation), 추출(extraction), 컬럼(colum chromatography, column)으로 7개였다. 또한 실험서를 참고하여 단위작업에 대한 실험 방법과 주요 사용물질, 노출 우려 step 등을 파악하였고, 연구대상자들에게 직접 검토를 받아 수정·보완 하였다. 측정 대상물질은 단위작업에 사용되는 VOCs 중 대상 실험실에서 사용빈도가 높고 인체 위험성이 있다고 알려진 10종(acetone, chloroform, dichloromethane(DCM), diethyl ether, ethyl acetate(EA), n-hexane, tetrahydrofuran(THF), benzene, toluene, xylene)으로 선정하였다.

2. 개인노출 평가

공기 중 개인노출 평가는 각 실험실당 3일 동안 실시하였고, 두 가지 방법을 적용하였다. 첫째, 연구자의 전체 작업시간 동안(약 6-11시간/일) 시료를 채취하여 하루 동안의 평균 농도를 평가하였고, 총 시료 수는 77개였다. 시료의 채취는 수동식 시료채취 방법으로, 유기증기용 모니터(Organic vapor monitor 3500, 3M, USA)를 모든 연구자들이 실험실에서 상주하는 내내 착용하도록 하였다. 둘째, 단위작업 시간 동안 시료를 채취하여 특정 작업으로 인해 노출되는 수준을 평가하였고, 총 시료 수는 139개였다. 단위작업 시간 동안 채취한 전체 시료 수는 대상 실험실의 연구자수보다 많은 경우가 대부분이고, 시료 채취 시간은 작업의 내용에 따라 9분에서 466분까지 다양하다. 측정기간 동안 연구자들로 하여금 시간활동일지(time-activity diary)를 작성토록 하여 실험을 하는 동안 사용한 화학물질의 종류와 실험 내용 및 시간 등을 조사하였다. 산업위생 전문가가 시료를 채취하는 동안 해당 내용을 추가로

조사하여 시간활동일지 내용과 비교분석 하였다. 시료의 채취는 대상 단위작업을 수행하는 연구자만(단위작업 실험자만)을 대상으로 그 단위작업을 수행하는 시간 동안 능동식 시료채취 방법으로 하였다. 유량보정기(Defender 510-M, Bios International Corp., USA)를 이용하여 0.2 L/min의 유량으로 보정된 저유량 펌프(Poket pump 210-1002, SKC Inc., USA)와 활성탄관(Anasorb CSC Tube Cat. No. 226-01, SKC Inc., USA)으로 시료를 채취하였다.

시료의 분석은 가스크로마토그래피 불꽃이온화검출기(GC-2010Plus, Shimadzu, Japan)를 이용하였다. 시료의 채취 및 분석은 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 NIOSH manual of analytical methods(NMAM no. 1003, 1005, 1300, 1457, 1500, 1501, 1609, 1610)를 활용하였다. 내부정도관리는 측정과 분석 과정에서 이루어졌다. 측정과정에서 현장 공시료와 실험실 공시료를 확보하였고, 분석과정에서는 대상물질별 탈착 효율을 확인하기 위하여 기지농도의 시료를 준비하여 분석하였다. 시료 채취와 분석 사이의 보관성 확인을 위한 실험을 10주간 진행하였다. 분석방법의 검출한계(limit of detection, LOD)는 표준시료의 최저 농도를 같은 기기 조건에서 7회 반복 측정하여 구하였다.

연구자의 혼합물질 노출을 평가하고자 시간가중평균 농도와 단위작업별 농도에 대해 혼합물질 노출지수(exposure index, EI)를 계산하였다. EI 계산은 미국 정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) Threshold Limit Values(TLVs[®]) and Biological Exposure Indices (BEIs[®])의 TLVs for mixtures 공식(ACGIH, 2017)에 준하였다. 식(1)에 따라 EI를 계산하였다. 단위작업 동안의 혼합물질 노출평가는 시간가중평균기준(TWA)과 단시간 노출기준(short-term exposure limit, STEL)을 모두 적용하여 실시하였다. STEL 노출기준이 없는 물질의 경우, TWA 노출기준의 5배를 적용하였다.

$$EI = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \quad (1)$$

Where: C_n = indicates the observed atmospheric concentration
 T_n = is the corresponding threshold limit(TLV-TWA, TLV-STEL or 5 times TLV-TWA value)

3. 자료의 분석

통계분석은 SPSS 18.0(SPSS Inc., USA)을 이용하여 수행하였다. Shapiro-Wilk 검정 결과, 자료의 분포가 정규성을 따르지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계분석 방법을 적용하여 자료를 분석하였다. 단위작업에 따른 노출 수준의 차이를 확인하고자 Kruskal-Wallis 검정을 실시하였다. 검출한계 미만인 시료의 경우 해당 물질의 1/2LOD 값을 적용하여 통계분석 하였다.

III. 결 과

1. 대상 실험실의 일반적인 특성

총 4개의 실험실에서 주로 수행하고 있는 실험, 주요 사용물질의 종류 및 양, 실험에 참여하는 인원 및 시간, 국소배기장치의 유무와 개수, 개인 보호구 착용 유무 및 종류에 대한 정보는 Table 1과 같다. 연구자들은 석·박사 과정의 대학원생들이며, 하루 평균 연구활동 시간은 10시간 이상이였다. 연구자들은 대체로 오전 9시에 출근하여 저녁 9시에 퇴근하였고, 실험이 없거나 실험 중 대기시간에는 책상에 앉아 논문을 읽거나 실험을 준비하는 일을 수행하였다. 주로 공통적으로 수행하는 실험은 반응, 추출, 컬럼이였고, 분석, 재결정, 증류 등의 작업들도 있었다. 실험 공간과 연구(공부) 공간이 나뉘져 있는 곳은 칸막이벽이 있는 A대학교의 정밀화학실험실 뿐이였고, 나머지 실험실은 실험 공간과 연구(공부) 공간이 공존하여 실험을 하지 않는 경우에도 노출이 일어날 수 있는 구조였다.

실험 공간은 흡후드가 2-9대가 설치되어 있었고, 환풍기는 없거나 1대만 설치되어 있었다. 개인 보호구의 경우, 대부분 실험복이나 실험용 앞치마를 착용하고 실험을 하는 경우가 많았던 반면, 보안경이나 보호 장갑은 제대로 착용하지 않았다.

대상 실험실에서 공통적으로 주로 사용하고 있는 물질은 acetone, DCM, n-hexane, THF였다. 특히 사용 물질 중 benzene, DCM, chloroform은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 발암성 물질로 분류한 물질이다(benzene: group 1, DCM: group 2A, chloroform: group 2B). n-Hexane은 신경독성이 강한 물질로 말초신경계 장애 등을 일으키고, toluene은 여성의 생식기계 손상 등을 일으키는 물질이다. 또한 acetone과 THF는 중추신경계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Diethyl ether, EA, xylene은 눈과 상기도 자극을 일으킨다. 또한 benzene, n-hexane, THF는 호흡기를 통한 노출뿐만 아니라, 점막, 눈, 경피로 흡수되어 전신 영향을 일으킬 수 있다(ACGIH, 2017; IARC, 2019). 이러한 물질들은 실험실 내 시약장에 보관되고 있었고, 그 중 2개 실험실만이 국소배기장치가 달려있는 시약장에 시약을 보관하고 있었다.

2. 대상 단위작업별 화학물질 노출 가능성

세척(washing)은 실험에서 사용한 각종 초자기구를 씻어내는 작업으로, acetone, chloroform, DCM, ethanol, n-hexane, methanol, isopropyl alcohol을 주로 사용한다. 유기화합물을 많이 사용하는 경우에는 주로 acetone으

Table 1. General characteristics of the organic synthesis laboratories

Univ.	Lab.	No. of lab. workers	Working hours per day	Major tasks	Major chemicals being used	Chemicals storage in the labs	No. of fume hoods and fans	Personal protection equipments used
A	Organic synthesis chemistry	8	10	Analysis, column, distillation, extraction, reaction, and recrystallization	Acetone, acetonitrile, DCM, diethyl ether, ethanol, EA, n-hexane, methanol, THF, toluene	Cabinet	Fume hood: 9 Fan: 0	Gloves, lab coats
	Fine chemistry	15	13	Column, distillation, extraction, and reaction	Acetone, benzene, chloroform, DCM, 1,2-dichloroethane, diethyl ether, N,N-dimethylacetamide, 1,4-dioxane, EA, n-hexane, methanol, toluene, THF, xylenes	Sealed ventilating cabinet	Fume hood: 4 Fan: 0	Gloves, lab coats, safety glasses
B	Organic metals chemistry	2	≥ 10	Reaction, and recrystallization	Acetone, benzene, DCM, diethyl ether, n-hexane, methanol, toluene, THF	Cabinet	Fume hood: 6 Fan: 1	Gloves, lab aprons
	Molecular drugs	2	≥ 10	Analysis, column, extraction, and reaction	Acetone, benzene, chloroform, DCM, N,N-dimethylacetamide, n-hexane, methanol, THF	Sealed ventilating cabinet	Fume hood: 2 Fan: 1	Gloves, lab coats

로 씻고, 합성세제만 사용하여 씻는 경우에는 acetone, ethanol 등의 유기용매로 여분의 잔류 유기물을 제거한다. 일반적인 합성세제 등으로 잘 세척되지 않을 경우에는 진한 황산이나 희석한 과산화수소를 합한 용액 등을 사용한다. 실험에서 사용한 유기화합물과 이를 씻어내기 위해 사용하는 유기용매로 인해 화학물질 노출이 발생된다. 여과(filtration)는 액체 혼합물에서 고체 물질을 분리하는 작업으로 여과할 혼합액을 깔때기에 거름종이를 끼우고 혼합액을 따른다. 주로 acetone, DCM, EA, n-hexane, methanol, toluene을 사용하며, 혼합액을 거름종이에 따를 때와 시료를 걸러낸 거름종이를 건조시킬 때 화학물질 노출이 발생된다. 반응 및 합성(reaction and synthesis)은 원하는 물질을 만드는 작업으로 플라스크에 합성하고자 하는 물질들을 넣고 유기용매로 녹이기 때문에 여러 종류의 화학물질을 사용한다. 재결정(recrystallization)은 고체 물질의 순도를 높이기 위한 작업으로 용해도의 차를 이용하여 불순물을 제거한다. 주로 DCM, EA, n-hexane, isopropyl alcohol를 사용하며, 재결정에 사용하는 용매로는 acetone, benzene, chloroform, DCM, diethyl ether, EA, ethanol, methanol, toluene, THF 등이 있다. 유기용매를 끓이면서 고체 생성물을 녹이고 여과하여 불순물을 제거할 때 화학물질 노출이 발생된다. 증류(distillation)는 혼합물을 분리하거나 시약을 정제하기 위한 작업으로 주로

amine, benzene, DCM을 사용한다. 증류할 혼합용액을 붓거나 분리한 증류액을 회수병에 모을 때, 감압증류 시 일정 압력으로 감압하면서 증류할 때 화학물질 노출이 발생된다. 추출(extraction)은 혼합물 중에 포함되어 있는 어떤 물질을 용매를 사용하여 뽑아내는 작업으로 주로 DCM과 EA가 사용된다. 분액깔때기에 용매를 넣고 한 손으로 상단의 마개를 쥐고 다른 손으로 스톱코크(stopcocks)를 잡고 거꾸로 하여 세계 흔들 때와 분리된 용매를 받아내는 작업을 할 때 화학물질 노출이 발생된다. 컬럼 크로마토그래피(column chromatography)는 여러 물질이 섞인 시료를 분리하기 위한 작업으로 주로 chloroform, DCM, EA, n-hexane, methanol, THF를 사용한다. 화학물질의 노출 발생 가능성이 큰 것은 컬럼 작업 중 컬럼관을 채우는 packing step이다. Packing은 시료를 주입하기 전 단계로, 틈이 발생하지 않게 packing이 잘 되어야 분리가 잘 이뤄진다. 이때 흡착제를 용매로 적시거나 흡착제가 첨가되는 동안 용매를 서서히 흐르게 하는데, 유기용매의 사용량이 많고, packing이 한 번에 이루어지지 않을 경우 여러 번 반복하기도 한다. 이들 작업은 반응 및 합성을 제외하고 대부분 실험대(lab bench)에서 수행된다.

3. 전 작업시간(full-shift) 화학물질 개인 노출 수준

연구자들이 실험실에 상주하는 동안 화학물질에 노

Table 2. Distributions of TWA concentrations of chemicals by laboratories

(unit: ppm)												
Lab.(N [*])	Sampling time(min)	Variables	Acetone	Chloro-form	DCM	Diethyl ether	EA	n-Hexane	THF	Benzene	Toluene	Xylene
Organic synthesis chemistry(23)	175 - 452	n (%) [†]	23 (100)	0 (0)	12 (52)	16 (70)	2 (9)	22 (96)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	1 (4)
		median	2.86	-	2.64	0.79	-	0.91	-	-	-	-
		(range)	(ND-59.3)	(ND)	(ND-7.17)	(ND-8.65)	(ND-1.68)	(ND-3.66)	(ND-1.95)	(ND)	(ND)	(ND-0.24)
Fine chemistry (42)	227 - 686	n (%) [†]	35 (83)	2 (5)	13 (31)	20 (48)	12 (29)	33 (79)	1 (2)	0 (0)	9 (21)	0 (0)
		median	4.29	-	1.15	0.40	0.80	0.50	-	-	0.25	-
		(range)	(ND-11.9)	(ND-3.10)	(ND-3.59)	(ND-1.75)	(ND-3.81)	(ND-4.69)	(ND-0.26)	(ND)	(ND-0.31)	(ND)
Organic metals chemistry(6)	211 - 509	n (%) [†]	6 (100)	0 (0)	4 (67)	2 (33)	0 (0)	1 (17)	3 (50)	3 (50)	2 (33)	0 (0)
		median	4.10	-	2.12	-	-	-	0.44	0.15	-	-
		(range)	(3.59-14.8)	(ND)	(ND-5.63)	(ND-1.61)	(ND)	(ND-0.96)	(ND-1.27)	(ND-0.20)	(ND-0.73)	(ND)
Molecular drug(6)	359 - 597	n (%) [†]	6 (100)	0 (0)	6 (100)	3 (50)	5 (83)	6 (100)	1 (17)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		median	29.8	-	4.12	0.87	5.17	2.41	-	-	-	-
		(range)	(11.2-44.7)	(ND)	(ND-9.19)	(ND-1.86)	(ND-9.40)	(ND-3.15)	(ND-1.09)	(ND)	(ND)	(ND)
MoEL TWA OELs [‡]			500 (250 [§])	10	50	400	400	50	50	0.5 (0.1)	50 (20 [§])	100

* Total number of samples

† Number of detected samples(detection rate)

‡ Time-Weighted Average(TWA) Occupational Exposure Limits(OELs) set by Ministry of Employment and Labor, Republic of Korea(MoEL), 2018

§ Time-Weighted Average(TWA) Threshold Limit Values(TLVs) set by American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), 2017

|| Time-Weighted Average(TWA) Recommended Exposure Limits(RELs) set by National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), 2018

출되는 시간가중노출평균농도(TWA) 결과를 Table 2에 요약하였다. 모든 실험실에서 acetone, DCM, diethyl ether, n-hexane, THF이 검출되었고, acetone(83-100%), DCM(31-100%), diethyl ether(33-70%), n-hexane(17-100%)은 높은 검출률을 보였다. 또한 모든 실험실에서 acetone의 농도가 중간값 2.86-29.8 ppm(ND-59.3 ppm)의 범위로 가장 높은 수준을 나타냈고, 그 다음으로 DCM의 농도가 중간값 1.15-4.12 ppm(ND-8.65 ppm)로 높게 나타났다.

우리나라 고용노동부 및 미국 ACGIH의 노출기준과 비교하였을 때, 기준을 초과한 곳은 없었다. 다만 발암 물질인 benzene은 B대학교 유기금속화학실험실에서 검출되었는데, 3개의 시료에서 0.09 ppm, 0.15 ppm, 0.20 ppm이었다. 우리나라 고용노동부와 미국 ACGIH의 노출기준(0.5 ppm)과 대비하여, 각 18%, 30%, 40% 수준으로 나타났으나, 미국 NIOSH 노출기준(0.1 ppm)과 비교하면, 모두 기준을 초과하는 수준이었다. Chloroform은 A대학교 정밀화학실험실의 2개 시료에서 검출되었고, 0.29 ppm, 3.10 ppm으로 노출기준(10 ppm) 대비 약 3%, 31% 수준으로 나타났다.

모든 실험실에서 검출된 acetone, DCM, diethyl ether, n-hexane, THF에 대해 실험실별 노출 수준을 비교하였다. Acetone의 농도 중간값이 가장 높은 곳은 B대학교 분자의약실험실(29.8 ppm)이었고, 최대 농도가 가장 높은 곳은 A대학교 유기합성실험실(59.3 ppm)이었다. DCM의 경우, B대학교 분자의약실험실이 농도 중간값과 최대값이 각 4.12 ppm, 9.19 ppm으로 가장 높았다. Diethyl ether는 B대학교 유기금속화학실험실을 제외하고 검출률이 50% 이상이었고, B대학교 분자의약실험실에서 농도 중간값이 0.87 ppm, A대학교 유기금속화학실험실에서 최대 농도가 8.65 ppm으로 가장 높게 나타났다. n-Hexane도 B대학교 유기금속화학실험실을 제외하고 검출률이 79% 이상으로 높은 검출률을 보였다. B대학교 분자의약실험실에서 농도 중간값이 2.41 ppm으로 가장 높았고, 최대 농도는 3.66 ppm인 A대학교 유기합성실험실에서 가장 높았다. THF의 경우 모든 실험실에서 검출되었으나, B대학교 유기금속화학실험실을 제외하고(검출률: 50%), 1개 시료에서 검출되었다. THF가 검출된 시료 중 A대학교 유기합성실험실 시료가 1.95 ppm으로 가장 높았다. EA와 toluene, xylene은 한 곳 혹은 두 곳 실험실에서 검출되었다. EA의 경우, 농도 중간값이 5.17 ppm(ND-9.40 ppm)으로 B대학

교 분자의약실험실에서 가장 높았다. 분자의약실험실에서 6개 시료 중 5개 시료에서 EA가 검출되었는데, 이는 플라스틱 재질의 대용량 용기 채로 실험대에 비치해두고 사용하고 있었기 때문에 실험실 내에 전체적으로 퍼져 연구자들의 노출에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 측정기간 중 이 물질을 옮겨 담는 과정에서 바닥에 다량 흘리는 사고가 발생하여 다른 실험실에 비해 높은 수준으로 검출되었을 것으로 추정된다. Toluene은 A대학교 정밀화학실험실 ND-0.31 ppm의 범위로 나타났고, B대학교 유기금속화학실험실 2개 시료에서 각 0.35 ppm, 0.73 ppm으로 검출되었다. Xylene은 A대학교 유기합성실험실 23개 시료 중 1개 시료에서 검출되었고, 그 농도는 0.24 ppm이었다.

4. 단위작업별 노출 특성

단위작업별 유해인자 분포를 파악하기 위하여 측정기간 동안 단위작업별로 사용된 화학물질의 횟수를 조사하였다. 세척 작업에서 acetone의 사용이 가장 많았고, 여과 작업에서는 DCM, 반응 및 합성 작업은 DCM과 THF, 추출 작업은 DCM과 EA, 컬럼 작업에서는 EA와 n-hexane의 사용 빈도가 높았다.

단위작업별 개인노출 시료는 작업별로 12개에서 47개였고, 그 작업에 사용되지 않은 물질들이 검출되기도 하였다(Table 3). 7개의 대상 단위작업 중 측정기간 동안 수행된 작업은 세척, 여과, 반응 및 합성, 추출, 컬럼이었고, 단위작업별 노출 농도가 가장 높게 나타난 것은 세척이었다. 주로 사용하는 물질인 acetone은 농도 중간값이 49.5 ppm(ND-284 ppm)이었고, DCM은 5.59 ppm(ND-18.2 ppm)이었다. 세척 작업에 사용되지 않은 물질 중 chloroform은 1개 시료에서 검출되었는데, 22분 동안의 농도가 3.79 ppm였다. Chloroform에 대한 우리나라 고용노동부와 미국 ACGIH의 단시간 노출기준이 없어 미국 NIOSH 기준치와 비교하였고, 기준치 2 ppm을 초과하는 것으로 나타났다. 여과 작업에서는 DCM과 THF가 자주 사용되었다. DCM은 농도 중간값이 3.71 ppm(ND-16.2 ppm)이었고, THF는 작업에 자주 사용된 것에 비해 1개 시료에서 1.27 ppm으로 검출되었다. 그 밖에 acetone과 n-hexane이 사용되었고, 각 농도 중간값은 8.38 ppm(1.32-29.6 ppm), 1.41 ppm(ND-34.1 ppm)이었다. n-Hexane의 최대 농도 34.1 ppm이 검출된 시료는 22분 동안 채취한 시료로, 단시간 노출기준이 설정되어 있지 않아 노출기준과 직접

Table 3. Distributions of task-based concentrations of chemicals

(unit: ppm)													
Tasks(N*)	Used chemicals	Sampling time(min)	Variables	Acetone	Chloro-form	DCM	Diethyl ether	EA	n-Hexane	THF	Benzene	Toluene	Xylene
Washing (12)	Acetone, DCM	9-56	n (%)†	10 (83)	1 (8)	6 (50)	2 (17)	5 (42)	8 (67)	3 (25)	1 (8)	1 (8)	0 (0)
			median (range)	49.5 (ND-284)	- (ND-3.79)	5.59 (ND-18.2)	- (ND-4.69)	2.00 (ND-28.3)	2.69 (ND-4.97)	0.76 (ND-1.04)	- (ND-0.12)	- (ND-2.61)	- (ND)
Filtration (12)	Acetone, DCM, n-Hexane, THF	6-76	n (%)†	12 (100)	1 (8)	8 (67)	4 (33)	3 (25)	10 (83)	1 (8)	1 (8)	4 (33)	0 (0)
			median (range)	8.38 (1.31-29.6)	- (ND-4.56)	3.71 (ND-16.2)	1.17 (ND-3.11)	2.23 (ND-2.25)	1.41 (ND-34.1)	- (ND-1.27)	- (ND-0.19)	0.84 (ND-1.53)	- (ND)
Reaction & synthesis (47)	Acetone, Chloroform, DCM, n-Hexane, EA, THF, Benzene, Toluene, Xylene	8-218	n (%)†	42 (89)	6 (13)	29 (62)	14 (30)	16 (34)	39 (83)	18 (38)	10 (21)	15 (32)	0 (0)
			median (range)	4.06 (ND-50.9)	0.17 (ND-2.61)	2.09 (ND-10.5)	1.16 (ND-6.26)	0.79 (ND-3.51)	0.75 (ND-8.23)	0.45 (ND-7.11)	0.07 (ND-0.27)	0.24 (ND-2.96)	- (ND)
Extraction (26)	Acetone, DCM, Diethyl ether, EA, n-Hexane, THF, Toluene	19-121	n (%)†	25 (96)	1 (4)	17 (65)	16 (62)	15 (58)	25 (96)	7 (27)	0 (0)	8 (31)	0 (0)
			median (range)	8.62 (ND-33.6)	- (ND-2.17)	2.65 (ND-17.1)	1.40 (ND-19.6)	1.95 (ND-14.1)	1.20 (ND-10.1)	1.23 (ND-3.07)	- (ND)	0.19 (ND-0.44)	- (ND)
Column (42)	Acetone, Chloroform, DCM, EA, n-Hexane, THF	25-466	n (%)†	42 (100)	11 (26)	41 (98)	24 (57)	35 (83)	41 (98)	11 (26)	0 (0)	13 (31)	2 (5)
			median (range)	4.10 (0.67-40.3)	0.98 (ND-1.59)	2.42 (ND-18.9)	0.36 (ND-6.45)	1.79 (ND-6.62)	2.08 (ND-12.6)	0.34 (ND-1.05)	- (ND)	0.11 (ND-0.46)	- (ND-0.35)
MoEL STEL OELs‡				750	- (2 ^b)	-	500	-	-	100	2.5 (1 ^c)	150	150
p-value				<0.001	0.007	0.045	0.032	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001

* Total number of samples

† Number of detected samples(detection rate)

‡ Short-term Exposure Limit(STEL) Occupational Exposure Limits(OELs) set by Ministry of Employment and Labor, Republic of Korea(MoEL), 2018

§ Short-term Exposure Limit(STEL) Recommended Exposure Limits(RELs) set by National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), 2018

^b Ceiling(C) Recommended Exposure Limits(RELs) set by National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), 2018

비교는 어려웠지만, 1976년 미국 ACGIH가 제안했다가 채택되지 않은 단시간 노출기준인 100 ppm과 비교했을 때, 약 34%의 수준이었다. Chloroform은 여과 작업 동안 사용하지 않았지만, 1개 시료에서 4.56 ppm으로 NIOSH 노출기준의 2배 이상으로 나타났다. 반응 및 합성 작업은 다른 작업에 비해 여러 종류의 화학물질을 사용하였으나, 일단 후드 안에 실험장치를 걸어 두고(소요시간 짧음) 다른 곳으로 이동하거나 문헌 공부를 하며 기다리는 경우가 대부분이어서 전반적으로 연구자들의 노출 정도가 낮은 편이었다. 그러나 발암 물질인 benzene을 사용한 경우가 있었으며, 43개 시료 중 10개의 시료에서 검출되었다. 농도 수준은 ND-0.27 ppm로 중간값이 0.07 ppm이었고, 다른 작업에 비해 benzene의 노출이 높았다. 추출 작업에서 자주 사용되는 물질은 DCM과 EA였다. DCM은 농도 중간값이 2.65 ppm(ND-17.1 ppm), EA는 1.95 ppm(ND-14.1 ppm)이었다. 컬럼 작업의 경우 DCM, EA, n-hexane가 자주 사용되었고, 농도 중간값이 각 2.42 ppm(ND-18.9 ppm), 1.79 ppm(ND-6.62 ppm), 2.08 ppm(ND-12.6 ppm)이었다.

5. 유기용제 혼합물질 노출 지수

실험실에서는 다양한 종류의 화학물질을 동시에 사용하는 경우가 많아 연구자가 화학물질에 복합적으로 노출될 가능성이 높다. 연구자들의 단일물질 노출에 대하여 정량 분석을 실시한 후 혼합물들이 각각에 대하여 상가작용을 일으킨다고 가정하고, 유기용제 혼합물질 노출에 대해 평가하였다.

연구자들의 전작업시간(full-shift) 혼합물질 노출을 평가한 결과, EI가 0.00-0.43의 범위로 모든 시료에서 기준인 1을 넘지 않았다. 가장 높은 EI(0.43)를 나타낸 것은 B대학교의 유기금속화학실험실 시료로, 10개의 대상물질 중 acetone, THF, benzene이 검출된 시료였다. 검출된 세 물질 중 노출기준의 40% 수준이었던 benzene이 EI에 기인한 것으로 판단된다.

단위작업을 하는 동안의 혼합물질 노출 평가는 TWA 노출기준과 STEL 노출기준을 모두 적용하여 실시하였다. TWA 노출기준을 적용하여 평가한 결과, 전체 EI의 범위는 0.00-1.50였다. 기준을 넘는 시료는 여과 작업 1개 시료에서 나타났고(1.50), 기준의 50% 이상인 시료는 모든 작업의 시료 중 9개로 나타났다(0.51-0.83). EI의

중간값으로 비교하면, 세척 작업에서 0.27로 가장 높았고, 컬럼, 여과, 추출, 반응 및 합성의 순이었다. STEL 노출기준을 적용한 결과에서는 EI가 0.00-0.39로 기준을 초과하는 경우는 없었고, EI 최대값(0.39)은 세척 작업 시료였다. 각 작업별로 EI 중간값을 비교하면, 세척이 0.11로 가장 높았고, 그 다음으로 컬럼, 여과, 추출, 반응 및 합성 순이었다. TWA 노출기준과 STEL 노출기준을 적용한 평가 결과는 방법별로 EI값은 달랐지만, 작업별로 EI가 높은 순서는 같았다.

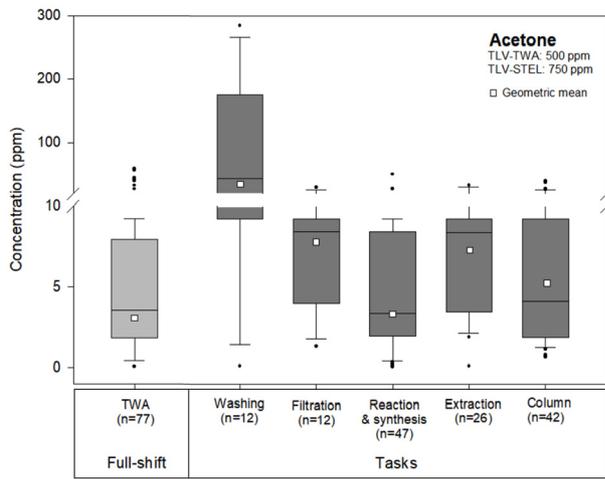
IV. 고 찰

실험실의 연구자는 학위 과정과 전문직 실험실 노동자로서 연구 활동을 하는 동안 화학물질이나 병원 미생물 취급 및 단순반복 작업 등 다양한 유해요인에 노출될 수 있다. 화학실험실 연구자의 경우 여러 연구들을 통해 발암성과 생식독성에 대한 위험이 확인되었고, 본 연구에서도 실험실 연구자의 상당한 유기용제 노출과 발암물질 등 독성이 강한 물질의 사용 및 노출이 확인되었다. 특히 발암물질인 benzene은 개인 TWA 시료와 단위작업별 시료 모두에서 검출되었고, 우리나라 고용노동부의 노출기준을 초과하지는 않았으나, 노출기준의 18%-40% 수준으로 결코 낮은 수준은 아니었다. 또한 Benzene을 직접 사용하지 않은 작업에서도 일부 검출되었는데, 이는 제조업 사업장에 비해 화학물질 사용량은 적지만, 실험 공간의 협소함으로 인해 직접 그 물질을 사용하지 않은 연구자에게 까지 노출이 발생된 것과 세척 작업과 같이 이전 작업에서 사용한 물질에 영향을 받은 것으로 판단된다. 비슷한 사례로 Byun et al.(2011)의 연구에서는 실험 공간과 공부 공간의 TVOCs 농도 분포를 직독식기기를 이용하여 확인하였는데, 실험실 내에서 실험이 수행된 즉시 연구 공간 내에서의 농도가 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 이는 모든 작업에서 동일한 패턴을 보였다고 보고하였다. 이 결과는 연구자가 실험을 하지 않는 동안에도 다른 연구자의 실험 활동으로 인하여 불필요하게 지속적으로 화학물질에 노출될 수 있다는 것을 시사한다.

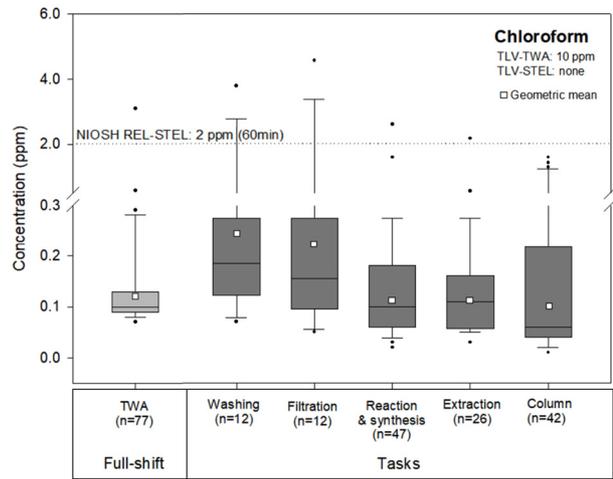
단위작업에 따른 노출 수준의 차이를 Kruskal-Wallis를 통해 확인한 결과(Table 3), 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 단일물질 노출과 혼합물질 노출 모두 세척 작업이 가장 높았는데, 이는 세척 작업이

acetone, alcohol류 등의 유기용매로 실험 후의 초자기구를 닦아내는 것이기 때문에 직접 사용한 화학물질과 잔여 유기물이 공존하기 때문으로 추정된다. 또한 세척 작업은 싱크대에서 이루어졌는데, 측정기간 동안 산업위생전문가의 작업 관찰과 연구자들 인터뷰 결과, 세척 작업이 실험의 일부가 아닌 단순한 설거지나 실험 준비 및 뒤처리로 인식되어 화학물질 노출에 무방비한 상태라는 것을 알 수 있었다. 세척도 실험 작업의 일부이고, 국소배기장치가 달린 싱크대에서 세척 작업을 수행하거나, 적어도 화학물질을 사용할 때는 후드 안에서 작업을 해야 한다.

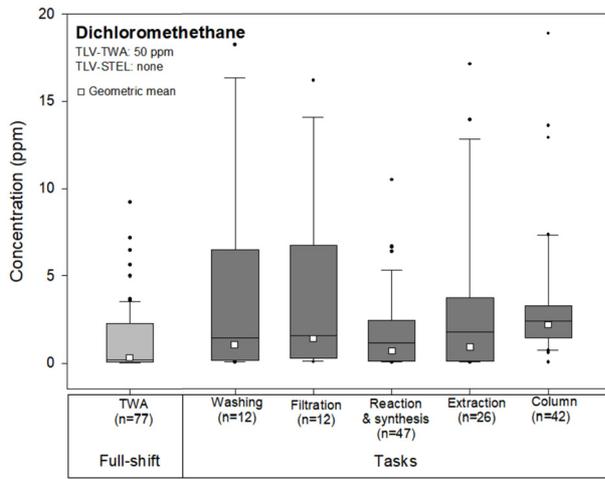
실험 작업은 일반 제조업 사업장에 비해 작업내용, 작업주기, 사용물질의 종류와 사용량 등이 매우 불규칙적이다. 이런 작업의 특성상 지속적이고 상시적인 작업이 거의 없어 TWA로 평가를 할 경우 단시간/일시적 고농도의 노출을 반영할 수 없고, 실험을 하지 않는 시간의 농도로 상쇄되어 과소평가될 우려가 있다. TWA가 단시간 노출을 반영하고 있는지를 알아보기 위하여 연구자의 TWA와 단위작업별 노출 농도의 범위를 물질별로 비교하였다(Figure 1). 연구자들이 단시간에 고농도로 노출되는 농도 범위를 TWA 농도 범위가 포괄하고 있지 못하는 것과 단위작업별 주요 사용 화학물질의 노출 범위를 TWA만으로는 예측하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 기존 연구들에서도 실험실에서 TWA 노출 평가는 한계가 있다는 것을 지적하며, 단위작업 중심의 노출 평가를 수행해야 한다고 하였다. Tan et al.(1999)은 MIT 실험실에서 학생들의 화학물질 노출 평가를 실시하였다. 전체 과정 동안 측정을 하였지만, 학생들이 간헐적이고 단시간 동안 실험을 하기 때문에 향후 연구에서는 학생들의 피크 노출(또는 최대 노출)을 파악하는 것이 중요하다고 강조하였다. Miller et al.(1999)는 다섯 곳의 지질공학 연구실험실에서 호흡성분진과 호흡성석영을 57개의 단위작업별로 채취하였다. 8시간 노출평가 수행의 문제점을 지적하며 단위작업 중심의 노출평가 전략(task-based exposure assessment strategy)을 수행해야 한다고 강조하였다. Yoo et al.(2000)의 연구에서는 일부 산업보건관련 기관의 분석실험실에서 유기용제를 측정하였다. 그 결과 작업환경의 노출기준보다 훨씬 낮은 수치로 나왔지만 작업시간 동안의 평균농도를 측정하였기 때문에 실험실 업무를 가장 많이 수행하는 시간대의 단시간 농도를 파악하지 못한 것을 제한점으로 보고하였다. Kretchman(2002)



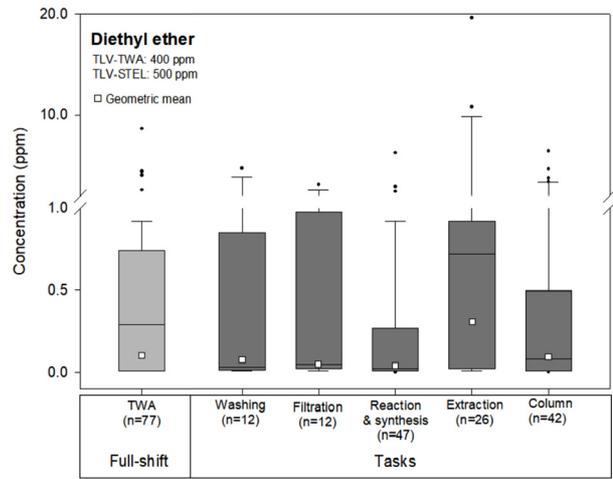
(a) Acetone



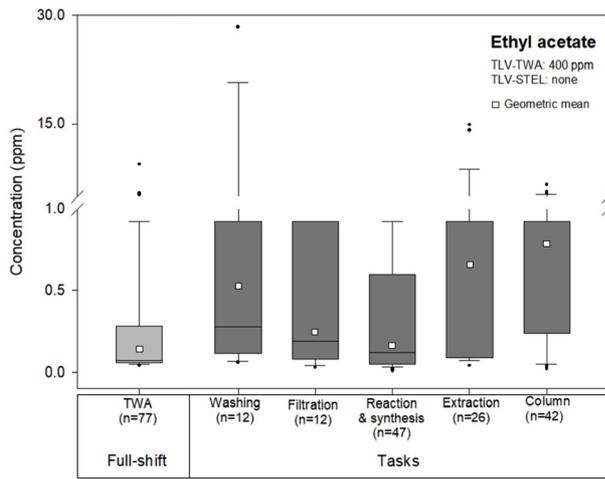
(b) Chloroform



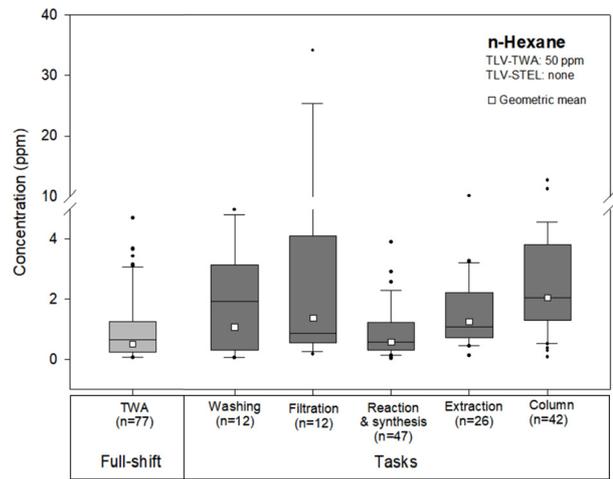
(c) Dichloromethane(DCM)



(d) Diethyl ether



(e) Ethyl acetate



(f) n-Hexane

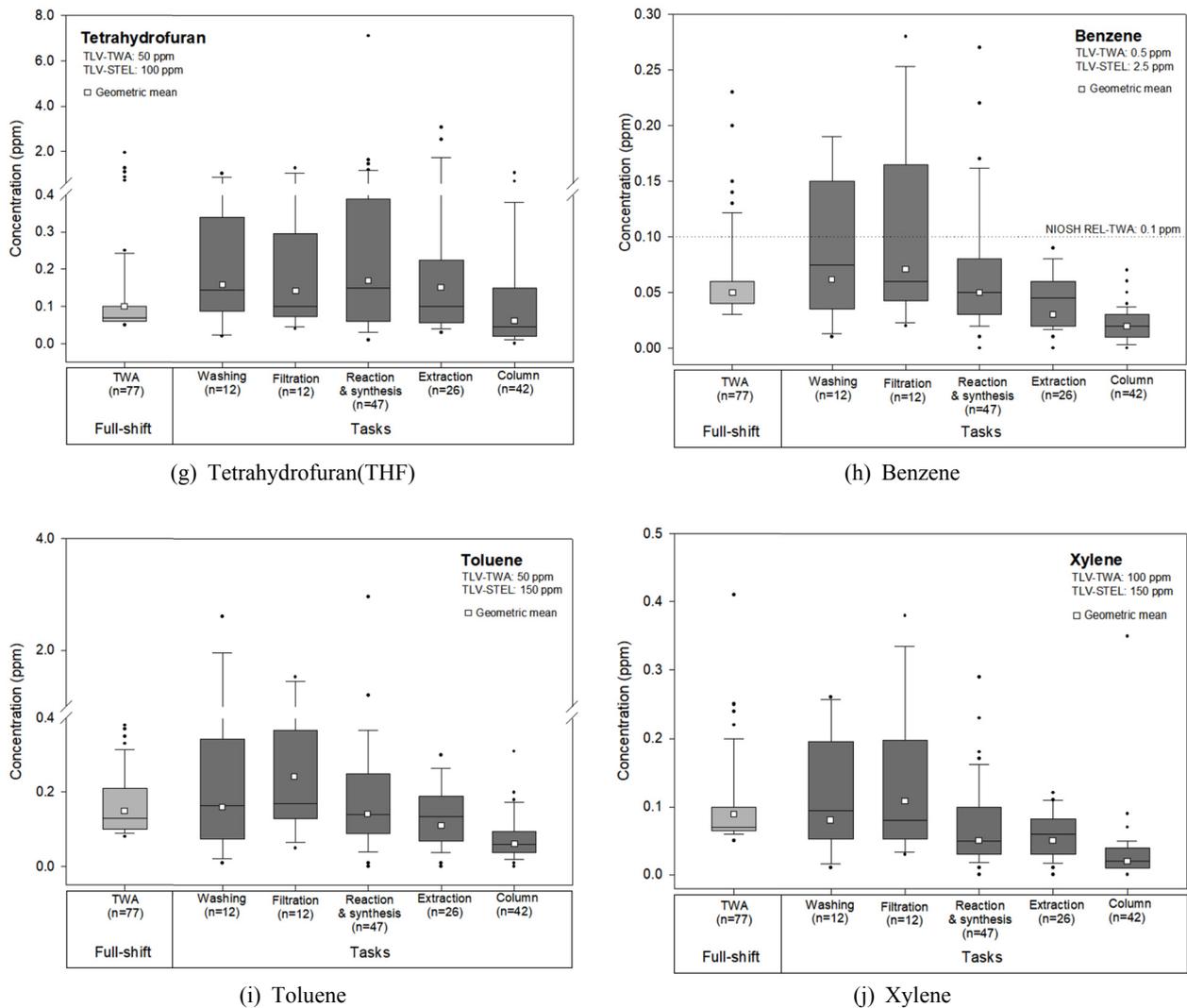


Figure 1. Comparison on concentrations between TWA and task-based exposure levels by tasks. The lower and upper bars denote the min and max, the bottom and top edges of the box show the 25th and 75th percentiles, respectively. The open square and the line within the box represent the geometric mean and median concentrations, respectively. Dots are outlier

은 연구실험실의 작업을 자세히 관찰하면 일상적인 작업을 찾을 수 있어 유사노출그룹(SEGs)에 대한 노출평가를 실시할 수 있으며, 그 결과를 발전시켜 유사 연구실험실에 적용할 것을 제안하였다. Choi et al.(2005)의 연구에서는 원유정제업 작업자들을 대상으로 유기용제 11가지 물질에 대해 개인 TWA와 단위작업 중심으로 채취한 단시간 시료(STEL)를 채취하였다. 각 유기용제 성분에 따른 TWA와 STEL의 산포도를 기하표준편차를 비교하여 확인하였고, 그 결과 작업시간 동안 평균적으로 노출되는 수준의 변이보다 단위작업에 따른 순간적인 노출수준의 변이가 2.5배 이상 크게 나타

났다. 특히 원유정제업과 같은 장치산업의 작업자들은 이동범위가 넓고, 현장점검 및 단위작업을 수행하며 장치 주변에 접근하는 특성이 있어 노출평가지 장시간 full-shift 평가로는 부족하며, 단위작업별 단시간 노출위험을 평가해야 한다고 강조하였다. Henn et al.(2007)은 18개의 군으로 나누어 각각의 직무군에 가중치를 주고 화학물질의 노출 정도를 추정하여 코호트 사망률과의 상관성을 분석하였다. 산업위생관련 노출 평가 결과가 부족한 현실에서 단위작업에 따른 노출 평가가 역학 조사를 수행하기 위한 적절한 방법이라고 제시하였다. Byun et al.(2011)의 연구에서는 6곳의 화학실험실

에서 TWA와 단위작업별 측정 방법으로 개인시료를 채취하고, 지역시료도 함께 채취하였다. 이 연구에서는 실험실에서의 정량적 노출 평가는 지역시료나 개인의 TWA 측정만 하기 보다는 실험 특성에 맞게 구체적으로 접근하는 것이 적절하다고 하였다. 또한 노출 패턴을 설명하고 역학 조사에 활용하기 위해서는 단시간 노출 평가가 타당하며, 확실적인 측정 방법을 그대로 적용하는 것 보다 작업의 개별적 특성을 반영할 수 있는 실시간 측정방법을 함께 활용할 것을 제안하였다. 이처럼 실험실의 화학물질 노출 평가는 TWA뿐만 아니라, 단위작업에 따른 평가가 함께 수행되어야 한다.

본 연구에는 세 가지 한계점이 있었다. 첫째, 단위작업 측정시 유량을 낮게 설정하여 과소평가된 시료가 있을 수 있다는 점이다. 작업별로 실험 수행 시간이 다양하고, 소요시간을 예측할 수 없어 8시간 TWA 측정시 적용하는 0.2 L/min의 유량을 적용하였다. 총 139개의 시료 중 시료채취 시간이 60분 이하인 시료는 85개, 이 중 15분 이하인 시료는 14개였다. 대상물질 중 EA는 사용빈도와 사용량이 비교적 많았던 것에 비해 검출한계 미만의 시료가 많았는데(65개), 이 시료들의 80%가 47분 이하의 시간 동안 채취된 것이었다. 둘째, 유기용제 혼합물질 노출 평가시 유기용제의 공통적인 건강영향인 말초신경장애에 대해 상가작용을 일으킨다고 가정할 후 노출지수를 계산하였기 때문에, 모든 건강영향을 반영하지 못하였다. 셋째, 실험내용에 대한 회상편견이 발생할 우려가 있었다. 실험을 하면서 바로 시간활동일지를 적어주는 연구자가 있는 반면, 실험이 모두 끝난 후 혹은 퇴근할 때 몰아서 작성해주는 연구자도 있었기 때문이다. 이를 보완하기 위하여 측정자(산업위생전문가)가 실험실에 함께 상주하여 실험 작업을 기록하였다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서는 기존 연구들에서 제한적으로 다뤄졌던 단위작업 중심의 노출 평가를 심도 있게 수행함으로써 간과되고 있던 위험작업을 찾고, 단위작업별 노출 평가 방법이 실험실 노출 평가에 반드시 포함되어야 하는 평가 방법임을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구는 종합대학교 두 곳의 화학물질을 합성하거나 분석하는 유기합성실험실 4개소를 대상으로 하여 연구자들의 전반적인 노출과 단위작업별 노출 수준

을 파악하였다. 대상 실험실에서 공통적으로 주로 사용하는 화학물질은 acetone, DCM, n-hexane, methanol, THF였다. 특히 발암물질인 benzene, chloroform, DCM은 모든 대상 실험실에서 적어도 하나 이상씩 사용되고 있었고, benzene의 경우 노출기준을 초과하지는 않았지만, 노출기준 대비 18-40% 수준으로 나타났다. 단위작업에 따른 노출 수준의 차이는 통계적으로 유의하였고($p < 0.05$), 세척 작업에서 유기용제 노출이 가장 높았다. 세척은 실험 작업이 아닌 것으로 인식되고 있었는데, 세척 작업시 사용하는 화학물질과 실험 후 남아있는 물질의 노출을 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 세척 작업시 국소배기장치가 달린 싱크대에서 작업을 수행하거나, 적어도 화학물질을 사용할 때는 후드 안에서 작업을 해야 한다. 연구자의 TWA 농도 범위와 단위작업 동안에 노출되는 농도 범위를 비교한 결과, TWA가 단시간 고농도의 노출을 포괄하지 못하였다. 실험실 작업의 특성상 TWA로 평가를 할 경우 단시간/일시적 고농도의 노출을 반영할 수 없고, 실험을 하지 않는 시간의 농도로 상쇄되어 과소평가될 우려가 있다.

실험실 작업자들의 유기용제 노출 특성은 일반 제조업 사업장에 비해 작업내용, 작업주기, 사용물질의 종류와 사용량 등이 매우 불규칙적이다. 따라서 실험실의 화학물질 노출 평가는 전 작업시간(full-shift)에 대한 평가뿐만 아니라, 단위작업에 따른 단시간 고농도 노출을 반영할 수 있는 노출 평가가 수행되어야 한다.

References

- American Conferences of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values(TLVs[®]) for chemical substances and physical agents & Biological Exposure Indices(BEIs[®]). ACGIH Cincinnati Ohio 2017
- Axelsson G, and Rylander R. Use of questionnaires in occupational studies of pregnancy outcome. *Ann Acad Med Singapore* 1984;13(2 Suppl):327-330
- Byun H, Park J. A Review on Chemical Exposure and Related Health Risks in Laboratory Workers. *J Environ Health Sci* 2010;36(6):441-455
- Byun H, Ryu K, Yoon C, Park J. Quantitative Assessment Strategy for Determining the Exposures to Volatile Organic Chemicals in Chemistry Laboratories. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2011;21(1):11-25

- Carpenter L, Beral V, Roman E, Swerdlow AJ, Davis G. Cancer in laboratory workers. *Lancet* 1991;338(8774):1080-1081([https://doi.org/10.1016/0140-6736\(91\)91938-q](https://doi.org/10.1016/0140-6736(91)91938-q))
- Chen YC, Ramachandran G, Alexander BH, Mandel JH. Retrospective exposure assessment in a chemical research and development facility. *Environ Int* 2012;39(1):111-121(<https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.10.008>)
- Choi SJ, Paik NW, Kim JK, Choi YK, Jung HH, et al. A study on workers' exposure organic solvents in petroleum refinery. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2005;15(1):27-35
- Ha JH, Shin YC, Lee HS, Paik S, Yi GY, et al. Evaluation of Air Contaminants Concentrations and Ventilation Systems in Governmental Agency and University Laboratories. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2010;20(1):63-69
- Halliday-Bell JA, Quansah R, Gissler M, Jaakkola JJ. Laboratory work and adverse pregnancy outcomes. *Occup Med (Lond)* 2010;60(4):310-313(<https://doi.org/10.1093/occmed/kqq018>)
- Henn SA, Utterback DF, Waters KM, Markey AM, Tankersley WG. Task- and time-dependent weighting factors in a retrospective exposure assessment of chemical laboratory workers. *J Occup Environ Hyg* 2007;4(2):71-79(<https://doi.org/10.1080/15459620601109407>)
- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human. 2019
- Jeong KB, Seo BS, Jang SH, and Lim KK. Organic chemistry experiment. Shinkwang; 2003. p.15-160
- Kauppinen T, Pukkala E, Saalo A, and Sasco AJ. Exposure to chemical carcinogens and risk of cancer among Finnish laboratory workers. *Am J Ind Med* 2003;44(4):343-350 (<https://doi.org/10.1002/ajim.10278>)
- Kretchman K. Exposure assessment in a laboratory environment. *Chem Health Saf* 2002;9(1):10-14([https://doi.org/10.1016/s1074-9098\(01\)00286-6](https://doi.org/10.1016/s1074-9098(01)00286-6))
- Kim MS and Paik NW. A Study on Organic Solvent Exposure in Chemical Laboratories of Universities. *J Institute Hlth Environ Sci* 1998;8(1):33-46
- Kubale T, Hiratzka S, Henn S, Markey A, Daniels R, and Utterback D. et al. A cohort mortality study of chemical laboratory workers at department of energy nuclear plants. *Am J Ind Med* 2008;51(9):656-667(<https://doi.org/10.1002/ajim.20601>)
- Meirik O, Källén B, Gauffin U, Ericson A. Major malformations in infants born of women who worked in laboratories while pregnant. *Lancet* 1979;314(8133):91 ([https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(79\)90136-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(79)90136-3))
- Miller SK. Exposures of geotechnical laboratory workers to respirable crystalline silica. *Appl Occup Environ Hyg* 1999;14(1):39-44(<https://doi.org/10.1080/104732299303403>)
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for chemical substances and physical agents. 2018
- National Institution for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods (NMAM) no. 1003, 1005, 1300, 1457, 1500, 1501, 1609, and 1610. 1994. Available from: URL:<http://www.cdc.gov/niosh/nmam>
- National Institution for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH pocket guide to chemical hazards. 2018
- Olin R. Leukaemia and Hodgkin's disease among Swedish chemistry graduates. *Lancet* 1976 Oct 23;2(7991):916 ([https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(76\)90589-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(76)90589-4))
- Park JH. Organic synthesis experiment. Shinkwang; 2011. p.8-80
- Tan YM, DiBerardinis L, and Smith T. Exposure assessment of laboratory students. *Appl Occup Environ Hyg* 1999;14(8):530-538(<https://doi.org/10.1080/104732299302521>)
- Walrath J, Li FP, Hoar SK, Mead MW, Fraumeni JF Jr. Causes of death among female chemists. *Am J Public Health* 1985;75(8):883-885(<https://doi.org/10.2105/ajph.75.8.883>)
- Wennborg H, Yuen J, Nise G, Sasco AJ, Vainio H, et al. Cancer incidence and work place exposure among Swedish biomedical research personnel. *Int Arch Occup Environ Health* 2001;74(8):558-564(<https://doi.org/10.1007/s004200100267>)
- Yoo KM, Roh YM, Han JG, Won JI. A Survey and Recommendation on Safety and Health for Occupational Health Laboratories. *Korean Ind Hyg Assoc J* 2000;10(2):150-164

<저자정보>

최영은(연구원), 추연희(연구원), 이익모(교수), 박정임(교수)