

화학실험실의 휘발성유기화합물 노출에 대한 정량적 평가전략

변혜정¹ · 류경남² · 윤충식² · 박정임^{3†}

¹서울대학교 보건환경연구소, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과,
³순천향대학교 환경보건학과

Quantitative Assessment Strategy for Determining the Exposures to Volatile Organic Chemicals in Chemistry Laboratories

Hyajeong Byun¹ · Kyongnam Ryu² · Chungsik Yoon² · Jeongim Park^{3†}

¹*Institute of Health and Environment, Seoul National University;*

²*Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University;*

³*Department of Environmental Health Sciences, Soon Chun Hyang University*

Working in a research laboratory means exposure to a wide range of hazardous substances. Several studies indicated that laboratory workers, especially working with chemicals, might have an increased risk of certain cancers. However, exposure assessment data in laboratory settings are scarce. This study was performed to examine several approaches for quantitatively assessing the exposure levels to volatile organic compounds (VOCs) among workers in chemistry laboratories. The list of 10 target VOCs, including ethanol, acetone, 2-propanol, dichloromethane, tetrahydrofuran, benzene, toluene, n-hexane, ethyl acetate, chloroform, was determined through self-administered questionnaire for six chemistry research laboratories in a university, a government-funded research institute, or private labs. From September to December 2008, 84 air samples were collected (15 area samples, 27 personal time weighted samples, 42 personal task-basis short-term samples). Real time monitors with photo ionization detector were placed during the sampling periods. In this study, benzene was

observed exceeding the action levels, although all the results were below the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Value (TLV). From the air sampling results, we concluded that (1) chemicals emitted during experiments could directly affect to neighbor office areas (2) chemical exposures in research laboratories showed a wide range of concentrations depending on research activities (3) area samples tended to underestimate the exposures relative to personal samples. Still, further investigation, is necessary for developing exposure assessment strategies specific to laboratories with unique exposure profiles.

Key Words : Chemistry laboratory, Laboratory workers, Exposure assessment, Personal exposures, Volatile Organic Compounds (VOCs)

접수일 : 2010년 11월 5일, 채택일 : 2011년 2월 21일

† 교신저자 : 박정임(충청남도 아산시 신창면 읍내리 646번지 순천향대학교 환경보건학과,
Tel: 041-530-1269, Fax: 041-530-1272, E-mail: jeongim@sch.ac.kr)

I. 서론

실험실은 매우 다양한 안전보건상의 문제점을 가지고 있다. 실험실에는 화학물질로 인한 폭발이나 화재, 추락 등의 안전상 문제 뿐 아니라 화학물질에 장기간 반복적으로 노출됨으로 인한 건강상의 문제도 상존한다. 즉, 실험실에서 사용하는 화학물질은 그 종류가 매우 다양하고 사용량도 소량 이기는 하지만 오히려 독성이 크거나 혹은 그 영향이 잘 알려지지 않은 물질들이 포함될 가능성이 크기 때문에 건강에 유해한 영향을 줄 수 있다.

실험실의 특성과 연구업무에 대한 접근성 부족으로 인해 간과되어 오던 실험실에서의 안전보건 문제는 최근 몇 년간 발생한 일련의 실험실 폭발사고와 인명피해로 인해 그 심각성이 고취되기 시작하였다. 이에 힘입어 2005년 ‘연구실 안전환경조성에 관한 법률’이 제정되었다. 그러나 현행법은 몇 차례 개정이 되었음에도 불구하고 안전관리에 치중한 경향이 있다. 연구활동종사자들의 건강보호와 관련한 부분은 정기적인 건강검진을 실시하도록 한 것이 전부이다(교육과학기술부, 2009). 이는 화재나 폭발 등의 안전사고는 그 피해가 즉시 적나라하게 드러나는 반면, 현재의 노출로 인해 오랜 시간이 지난 이후 발생할 수도 있는 연구활동종사자들의 건강피해는 연관성을 파악하기조차 어렵기 때문이다.

그러나 실험실 특히 화학이나 생물학 실험실에 근무한 경험에 있는 연구활동종사자들의 건강 위험은 역학 연구를 통하여 꾸준히 제시되었다. 실험실에서 일정 기간 다양한 발암 위험물질에 노출된 연구활동종사자들은 다양한 암, 예를 들어 백혈병, 골수종, 유방암, 자궁암, 갑상선암, 전립선암, 피부암 등이 발생하거나 이로 인해 사망할 위험이 일반 인구에 비해 통계적으로 유의하게 증가하는 추세를 보인다(Hoar 등, 1981; Walrath 등, 1985; Maher 등, 1986; Sharam 등, 2003a; Sharam 등, 2003b; Kubale 등, 2008). 또한, 여성 연구자의 자연 유산을 증가시키고 남성의 경우 정자수를 감소시키는 등 생식계에 영향을 미치기도 한다(Taskinen 등, 1994; Chang 등, 2001; Wennborg 등, 2002). 실험실에서의 화학물질에 대한 노출 평가 연구는 매우 제한적으로 이루어지고 있다(Apostoli 등, 1996; Yu-Mei 등, 1999; Haruo 등, 2007; Henn 등, 2007).

우리나라에서는 아직까지 실험실 연구활동종사자들의 건강 위험에 대한 연구가 거의 이루어진 바가 없다. 다만 연구활동종사자들의 인식도나 주관적인 자각 증상에 대한 설문 조사 연구가 일부 있었을 뿐이다(이한주, 1995; 류경남 등, 2001). 실험실에서의 화학물질 노출 평가에 대한 연구도 문제 제기 수준에 머무르고 있다(김명신, 1996; 유계목 등, 2000; 하주현 등, 2010). 전통적인 제조업의 경우는 생산품을 만들기 위한 공정 흐름을 가지고 상시 혹은 비상시로 근무하

는 근로자가 동일한 부서에 근무하면서 같은 작업을 장시간 반복하는 것이 특징이라면, 실험실은 대부분의 작업이 간헐적이고 단시간에 이루어지며 정해진 패턴이 있다기보다는 연구의 진행 상황에 따라 그 내용이 달라질 수 있다는 것이 특징이다.

무엇보다 연구활동종사자들이 어떤 종류의 화학물질에 어느 정도 노출되고 있는지에 대한 기본적인 데이터가 거의 전무하여 건강 영향을 연구함에 있어서 그 연관성을 밝히기에는 상당히 부족한 면이 있다. 실험실에서 수행하기에 적절한 노출 평가 전략의 수립이 아직도 이루어지지 않았기 때문에 기존의 환경보건이나 산업위생에서 활용하고 있는 전략들을 비교 검토 없이 적용하여 수행하고 있는 것이 현실이다. 따라서 작업환경측정에 사용되는 8시간 시간가중평균치에 근거한 노출 평가는 실험실에서 적절한 평가방법이 아닐 수 있다.

본 연구의 목적은 기존의 제조업체 등에 적용되었던 다양한 노출 평가 방법을 연구실험실에 적용 및 비교함으로써 연구활동종사자의 노출 평가에 타당한 전략을 모색하는 것이다. 즉, 1) 화학실험실 내에서 발생하는 화학물질의 공기 중 농도를 개인 시료와 지역 시료 및 시간가중과 실시간 측정으로 나누어 실시하고, 2) 8시간 시간가중노출 평균 농도와 단시간 노출농도를 비교하고, 3) 각 방법 간의 장단점을 비교함으로써, 4) 연구활동종사자의 화학물질 노출 평가에 타당한 방법을 고찰하였다.

II. 연구방법

1. 노출 평가 전략

실험실 노출 평가를 수립하기 위하여 다음 Figure 1과 같은 전략을 수립하였다. 이는 기존에 제조업을 대상으로 한 산업위생학적 노출 평가 전략을 기본으로 적절한 대안을 수립하기 위한 다양한 시도(특히 ①, ②, ③)를 포함하였다.

2. 연구 대상 선정과 예비 조사

본 연구는 2008년 10월부터 2008년 12월까지 화학물질을 합성하거나 분석하는 서울 및 경기 지역 소재의 실험실 6곳을 선정하여 측정을 실시하였다. 이 중 실험실 2곳은 서울 시내 대학 실험실로, 화학물질 합성이, 나머지 4곳은 정부 혹은 민간 연구소로 화학물질 분석이 주요한 업무였다. 본 조사를 하기에 앞서 연구자들이 대상 실험실들을 방문하여 예비조사를 실시하였다. 이를 통하여 각 실험실의 특성, 수행되는

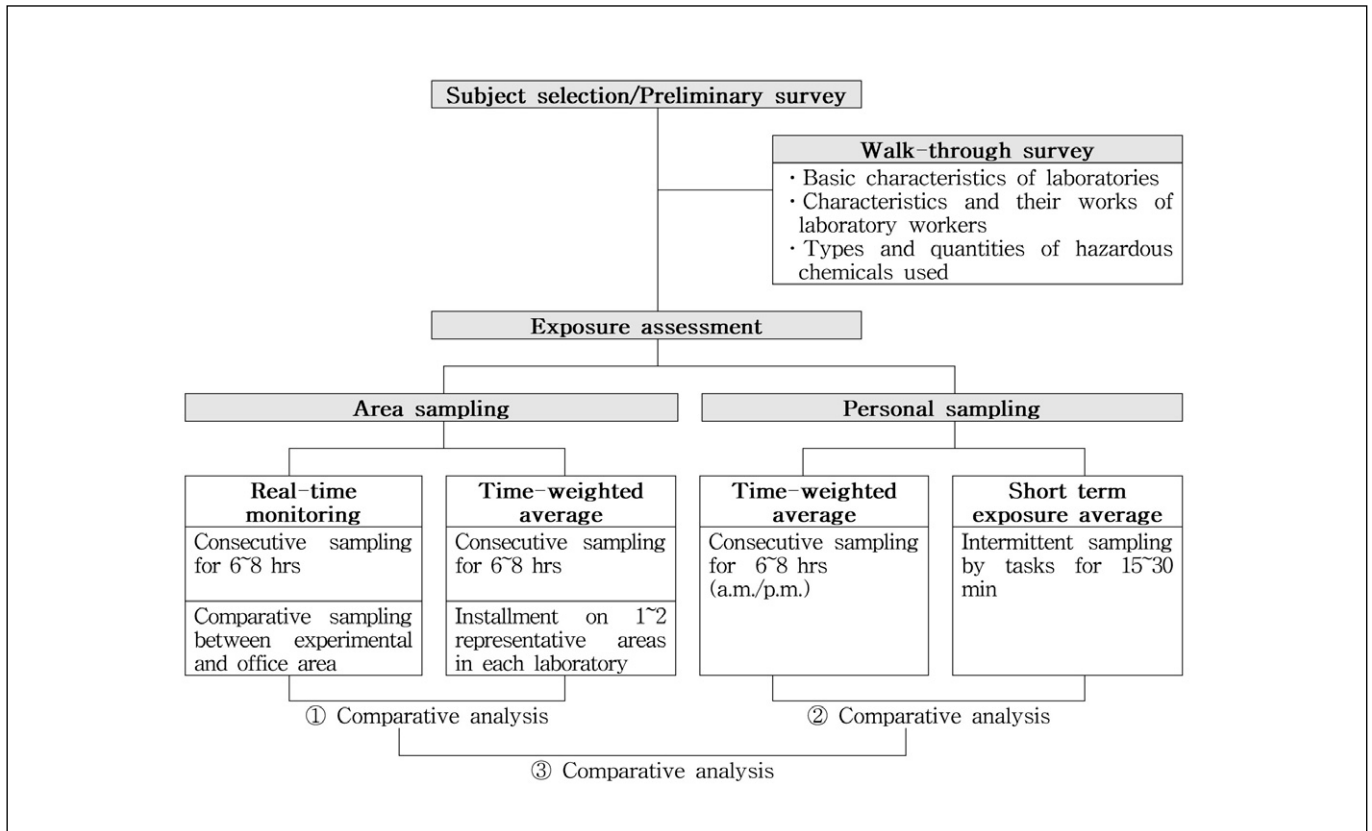


Figure 1. Exposure assessment strategy for chemistry laboratories in this study.

실험의 내용 및 방법, 실험에 참여하는 인원 및 시간 배분, 사용하는 화학물질의 종류 및 사용량 등을 파악하였고 이를 바탕으로 측정 대상 물질 및 측정 위치, 측정 방법 등을 결정하였다.

측정 대상 물질은 연구 대상 실험실에서 사용하는 화학물질 중 사용 빈도가 높고 발암성 같은 인체 위험성이 있다고 알려진 10종 (에탄올, 아세톤, 2-프로판올, 디클로로메탄 (메틸렌클로라이드), 테트라하이드로퓨란, 벤젠, 톨루엔, 노말헥산, 에틸아세테이트, 클로로포름)을 선정하였다. 벤젠은 미국정부산업위생전문가협회 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 및 국제암연구기관 (International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 정한 1급 발암물질로서 백혈병을 유발하는 것으로 알려져 있다. 또한, 디클로로메탄 및 클로로포름의 경우 ACGIH는 A3, IARC는 2B에 해당하고 사람에게는 명확하지 않으나 동물에게는 암을 발생시킬 수 있는 물질이다. 아울러 디클로로메탄은 중추신경계 손상 및 일산화탄소 헤모글로빈 빈혈을 유발시키고, 클로로포름은 마찬가지로 중추신경계 및 간 손상, 태아에 대한 독성학적 영향을 준다는 연구 결과가 있다. 톨루엔은 시각 손상 및 여성의 생식기계 손상 등을 일으키고 노말헥산의 경우는 암을 일으키지는 않으나 중추신경계 손상 및

말초신경계 신경장애 등을 유발한다. 또한 에틸아세테이트나 에탄올, 아세톤, 2-프로판올, 테트라하이드로퓨란은 상기도 및 눈 자극을 일으키고 특히 아세톤과 2-프로판올, 테트라하이드로퓨란은 중추신경계에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (ACGIH, 2010; IARC, 2010).

개인 시료 측정 대상자는 각 실험실에서 주요한 작업을 수행하는 석·박사급의 연구활동종사자들 (3~5명)로 선정하였다. 이는 조사 대상 실험실에서 실험을 하는 연구활동종사자의 인원수가 평균 7명 정도임을 감안할 때 절반 이상을 포함하는 것이었다.

3. 측정방법

실험 연구는 간헐적 비연속적인 작업이 대부분이기 때문에 연구활동종사자들의 노출 패턴도 변이가 클 수 있다. 노출 패턴과 작업 간 변이를 분석하기 위해 지역 및 개인 시료, 실시간 직독식 측정 방법을 동시에 수행하였다. 첫 번째는, 실시간 휘발성유기화합물 측정기 (ppb RAE 3000, Model PGM 7340, RAE systems Inc., San Jose, CA, USA)를 각 실험실의 중앙 위치에 설치하여 24시간동안 측정함으로써 노출 패턴을 실시간으로 파악하였다. 농도 기록 시간 간격은 1분으

Table 1. Sample numbers in this study by sampling method and laboratory

#	Laboratory	Area sample			Personal sample	
		Real-time		TWA	TWA	Task-based
		Lab.	Office			
A	fine chemistry laboratory	1	1	3	4	8
B	materials chemistry laboratory	1	1	2	5	5
C	characterization research center	1	1	4	4	7
D	materials analysis research center	1	1	2	5	5
E	chemoinformatics laboratory	1	1	2	4	8
F	environmental chemical analysis laboratory	1	1	2	5	8
Total	-	6	6	15	27	41

로 하였고 측정하기에 앞서 10 ppm 이소부틸렌 가스로 보정을 실시하였다. 또한 실험이 직접 수행되는 곳 뿐 아니라 연구활동종사자들이 문헌 리뷰를 하거나 실험 결과를 정리하는 인접 연구 공간에도 측정기기를 동시에 설치하여 실험 공간에서 실험이 이루어질 때 주변 공간에 미칠 수 있는 영향에 대해 조사하였다. 이 연구에 사용된 직독식 측정기기는 개별 휘발성유기화합물 (Volatile Organic Chemicals, VOCs)이 아니라 총휘발성유기화합물 (Total VOCs, TVOCs)을 측정하는 기기이다. 따라서 개별 물질의 정량적인 평가는 불가능하고 다만 시간에 따른 노출 패턴만을 예측할 수 있었다.

두 번째는, 지역 시료 측정으로 실험실 공기에 존재하는 개별 VOCs를 정성 및 정량적으로 파악하기 위해서 수행되었다. 저유량 펌프 (Gilian Inc., Clearwater, FL, USA)와 활성탄 흡착관 (SKC Inc., PA, USA)을 연결하여 각 실험실에 있는 2~3개의 실험대 위에 설치하였다. 이는 연구활동종사자들의 호흡기 위치와 비슷하였다. 측정은 연구활동종사자의 근무시간에 맞추어 약 6~8시간동안 지속적으로 이루어졌고, 총 시료 수는 15개였다.

세 번째는, 개인 시료 측정으로 두 가지 방법을 적용하였다. 하나는 대상 연구활동종사자가 실험을 진행하는 약 6~8시간 동안의 근무시간 내내 개인에게 시료를 채취하여 연구활동종사자가 하루 동안 실험을 하면서 누적적으로 노출되는 VOCs를 측정하였고, 총 시료 수는 27개였다. 또 하나는 각 연구활동종사자가 특정 개별 작업을 수행하는 10~15분간의 단시간동안 각각 측정을 함으로써 특정 작업으로 인해 노출되는 VOCs의 패턴을 파악하였고, 총 시료 수는 41개였다. 특정 개별 작업은 크게 세척, 합성, 정제, 추출, 증발 등으로 구분되고, 일부 이루어지는 재결정이나 여과 등의 작업은 기타로 구분하여 총 6개 작업으로 구별하였다. 각 실험실별 측정 방법별 시료 수는 Table 1에 정리되어 있다.

훈련받은 연구자들이 직접 작성한 체크리스트로 실험실의

창문과 출입문 개수 및 위치, 후드 유무, 보호구 종류 및 작업 시간 등을 파악하였고 연구활동종사자들로 하여금 시간활동일지 (time-activity diary)를 작성토록 하여 실험하는 동안 사용한 화학물질 종류와 실험 내용 및 시간 등을 조사하였다.

4. 분석방법

채취가 완료된 활성탄관은 즉시 밀봉하여 아이스박스에 담아 운반하였고 분석 전까지 냉장 보관하였다. 시료의 분석 방법은 미국국립산업안전보건연구원 (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 공정시험법을 활용하였으며 이 방법에 근거하여 각 시료는 가스크로마토그래피-불꽃이온화검출기 (gas chromatography-flame ionization detector, GC-FID, Agilent-6890N, USA)로 분석하였다. Agilent 7683B 시리즈의 autosampler와 GC chemsoft station (Rev. A. 10.02, 1757)을 함께 사용하였으며 화학물질 분석을 위한 기기조건 및 칼럼 종류 등의 자세한 사항은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 99%의 신뢰도로 분석될 수 있는 화학물질의 최소 농도인 분석검출한계 (Method Detection Limit, MDL)를 구하기 위하여 표준 시료의 최저 농도를 같은 기기 조건에서 7회 반복 측정하였다. 그 결과 각 화학물질의 MDL은 에탄올이 2.1 μg , 아세톤이 2.7 μg , 2-프로판올이 2.3 μg , 디클로로메탄이 3.5 μg , 테트라하이드로퓨란이 3.3 μg , 벤젠이 3.7 μg , 톨루엔이 3.4 μg , 클로로포름이 2.9 μg , 헥산과 에틸아세테이트가 0.8 μg 이었다. 시료 중 검출되지 않았거나 MDL 이하의 농도값에 대해서는 각 화학물질 MDL의 절반값을 적용하여 통계 처리하였다.

5. 통계처리

통계분석은 SPSS 12.0K for windows (SPSS Inc., USA) 프로

Table 2. Analytical conditions of gas chromatography for the chemicals

Category	A Group ¹⁾	B Group ²⁾
Instrument	Gas Chromatography (GC, Agilent-6890N)	
Detector	Flame Ionization Detector (FID)	
Injector	Auto liquid sampler (Agilent 7683B series)	
Carrier gas	He (99.999%)	
Column	Supelco Fused silica capillary column (Supelco 41289-04B) 30.0m × 250 μ m × 1 μ m	HP-INNOWax (Crosslinked Polyethylene Glycol, HP 19091N-113) 30.0m × 320 μ m × 0.25 μ m
Flow rate	1.3ml/min	4.1ml/min
Split ratio		10:1
Injection volume		1.0 μ l
Temperature		
Injector	150°C	200°C
Detector		250°C
Column	30°C(6min) → 10°C/min(8min) → 110°C(0min)	30°C(4min)

¹⁾A Group: ethanol, acetone, 2-propanol, dichloromethane, tetrahydrofuran, benzene, toluene

²⁾B Group: n-hexane, chloroform, ethyl acetate

그램을 활용하였고, 그래프는 SigmaPlot 8.0을 이용하여 작성하였다. 각 물질별 농도 분포의 정규성을 보기 위하여 Shapiro-Wilk 검정을 실시하였고 각 농도의 평균 및 표준편차 등은 일반적인 기술 통계를 통해 구하였다. 또한, 실험량에 따른 실험실간의 화학물질 농도를 비교하기 위하여 일원분산분석법 (ANOVA)으로 그 유의성을 검증하였다. 본 연구에서는 농도 분포가 정규분포에 가까워 산술평균과 표준편차를 적용하였다. 지역 시료 농도와 개인 시료 중 시간간중평균농도와의 상관성을 보기 위해서는 상관분석을 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 대상 연구실험실의 특성

총 6개의 대상 연구실험실의 주요 업무 및 취급 화학물질의 종류, 국소배기후드의 유무와 개수, 개인 보호구 착용 유무 등에 대한 정보는 Table 3에 제시되어 있다. 주요 작업은 합성, 정제, 세척, 추출, 증발 등이었고 기타 재결정이나 여과 등의 작업들도 있었다. 작업은 상시로 이루어지기보다는 간헐적, 집중적으로 단기간씩 이루어졌고 석·박사급의 연구원들이 각각 한두 작업을 맡아서 수행하는 경우가 대부분이었다. 연구자들은 대체로 오전 9시 출근에 오후 6시 퇴근이었

고 실험이 없을 경우에는 연구실에서 논문을 읽거나 실험실에서 실험을 준비하는 일을 수행하였다.

실험실 공간은 연구 공간과 실험 공간이 나뉘어져 있는 곳도 있었지만 대부분이 칸막이가 없는 상태여서 실험 공간에서 실험을 할 경우 연구 공간에 있는 연구자들에게까지 영향을 줄 수 있는 구조였다. 실험 공간은 대부분 실험대가 2~3개 정도 놓여 있고 한 쪽에 흡 후드가 4~7대가 설치되어 있었다. 기타의 국소배기장치는 없었고 실험실 전체의 환기는 자연 환기에 의존하고 있었다. 개인 보호구의 경우, 대학교 실험실에 있는 연구자들은 실험복을 입지 않고 하는 경우가 많았던 반면에 보안경이라든가, 보호 장갑, 혹은 호흡용 보호구 등을 착용하는 것에 대해서는 거부감도 별로 없었다. 오히려 정부 혹은 민간 연구기관 연구자들의 경우, 실험복은 모두 입고 있으나 기타의 개인 보호구는 착용하지 않는 경향을 보였다. 호흡용 보호구를 제대로 착용하고 작업하는 실험실은 대학의 한 군데 실험실뿐이었다.

전반적인 안전보건관리 수준으로, A와 B 실험실은 실험량이 상대적으로 많은 편이고 책임자의 관심 정도에 따라 관리 수준의 차이가 있었다. C, D, E 실험실은 실험량이 다른 실험실들에 비해 적은 편으로 따라서 실험실이 비교적 깨끗하고 관리 수준도 나은 편이었다. 반면에 F 실험실의 경우는 민간 연구기관에 속하여 다른 대학교나 정부 연구기관에 비해 그 실험량이 훨씬 많았으나 관리수준은 미흡한 상태였으며, 가

Table 3. Characteristics of six chemistry laboratories included in this study

#	Laboratory	Category	Main tasks	Chemicals mostly used	Laboratory workers	Work burden	No. of fume hoods	PPE ¹⁾
A	fine chemistry laboratory	university	synthesis, refinement, rinsing	tetrahydrofuran, acetone, n-hexane, ethyl acetate	7	high	4	safety goggles
B	materials chemistry laboratory		synthesis, refinement, extraction	dichloromethane, n-hexane, ethyl acetate,	6	low	4	safety goggles safety gloves
C	characterization research center	research institute	filtering, evaporation	acetone, n-hexane, acetonitrile	4	low	6	safety gloves respirators
D	materials analysis research center	(governmental)	synthesis, refinement, spin coating	tetrahydrofuran, dichloromethane, n-hexane	5	medium	7	safety gloves
E	chemoinformatics laboratory	research institute	rinsing, refinement, reaction, extraction, recrystallization	n-hexane, acetone, ethyl acetate, dichloromethane,	5	medium	7	lab coats
F	environmental chemical analysis laboratory	(private)	rinsing, extraction	n-hexane, acetone, dichloromethane	9	high	5	lab coats

¹⁾PPE: Personal Protective Equipments

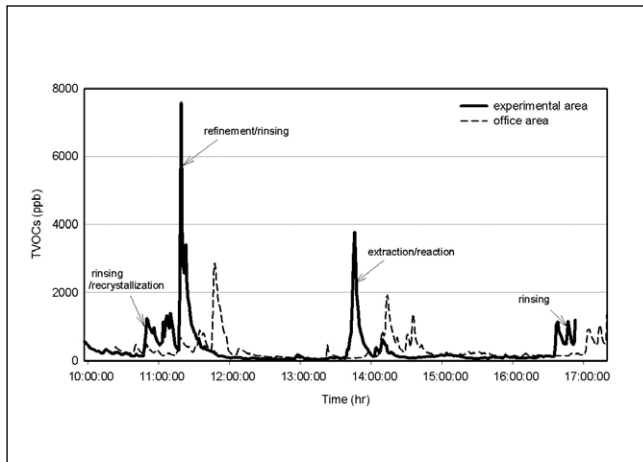


Figure 2. Comparison on TVOCs concentrations between experimental and office area.

장 많은 인원 (9명)이 근무하고 있었다. 실험량은 조사자가 화학물질 사용량 및 빈도, 작업횟수 및 지속시간 등을 고려하여 판단하였다.

2. 실험 공간과 연구 공간의 농도 분포

E 실험실은 실제 실험을 하는 곳 (실험 공간)과 고유하게 논문을 읽는 등의 연구를 하는 곳 (연구 공간)과의 사이에 칸막이가 있다. 실험이 수행되고 있을 때 별도의 공간으로 마련된 연구 공간까지 영향을 미치는 지에 대해 파악하기 위해서 동일한 시간대에 실시간 TVOCs 농도 분포를 조사해 본 결과, Figure 2와 같은 양상을 보였다. 즉, E 실험실 내에서 실험이

수행된 즉시 연구 공간 내에서의 농도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 모든 작업에서 동일한 패턴을 보였는데, 특히, 세척이나 정제 작업이 동시에 일어날 때 실험 공간에서의 피크가 약 8,000 ppb까지 상승하였다. 그 작업이 끝나고 나서는 일정하게 매우 낮은 농도로 존재하던 연구 공간의 TVOCs 농도가 약 3,000 ppb까지 급격하게 상승하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 실험 공간과 연구 공간이 분리되어 있어서 영향을 그리 미치지 않을 것이라고 예상하였으나, 실제 평가를 해 본 결과 실험 공간에서의 실험 작업이 연구 공간에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 연구활동종사자들이 상시로 실험을 하지 않는다고 하여도 다른 연구활동종사자들의 실험으로 인하여 지속적으로 유해물질에 노출이 될 수 있고 칸막이 등으로 공간을 달리 한다고 해서 이러한 영향이 완전히 없어지는 것은 아니라는 사실을 보여준다. 비슷한 사례로 Apostoli 등 (1996)의 연구에서는 독성학 실험실 내 실험 준비하는 곳과 분석, 그리고 실험이 이루어지지 않는 영역 등에서 다양한 물질들에 대한 평가를 시도하였고 톨루엔, 크실렌, 포름알데히드, 디클로로메탄 등의 화학물질들이 실험이 이루어지지 않는 장소에서도 검출되었다고 보고한 바 있다.

3. 개인 시료 및 지역 시료의 시간가중노출 평균값

각 실험실의 연구활동종사자들이 전 작업 시간동안 사용하는 화학물질에 노출되는 시간가중노출평균농도 (Time-Weighted Average, TWA)를 지역 시료와 개인 시료를 통해 구

Table 4. Distributions of time-weighted average concentrations of 10 chemicals in six laboratories (area samples)

Lab.	No	time-weighted average concentrations [Mean (min, max)] (unit: ppm)									
		ethanol	acetone	2-propanol	dichloro-methane	tetra-hydrofuran	benzene	toluene	n-hexane	ethyl acetate	chloroform
A	3	0.01 (-)	14.96 (4.70, 22.72)	0.11 (0.01, 0.19)	2.70 (0.96, 3.61)	0.05 (0.01, 0.12)	0.23 (0.08, 0.39)	0.03 (0.02, 0.04)	4.58 (1.94, 8.75)	1.60 (0.70, 2.83)	0.28 (0.14, 0.48)
B	2	0.26 (0.07, 0.45)	0.59 (0.45, 0.73)	1.16 (0.22, 2.10)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.02 (-)	0.47 (0.37, 0.57)	0.10 (0.05, 0.16)	0.005 (-)
C	4	0.01 (-)	0.07 (0.03, 0.11)	0.01 (-)	0.07 (0.05, 0.09)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.06 (0.03, 0.12)	0.04 (0.02, 0.05)	0.005 (-)
D	2	0.01 (-)	0.02 (0.01, 0.02)	0.23 (0.01, 0.46)	0.91 (0.01, 1.81)	0.26 (0.01, 0.52)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.25 (0.00, 0.49)	0.35 (0.00, 0.69)	0.005 (-)
E	2	0.04 (-)	0.10 (0.09, 0.11)	0.05 (0.04, 0.05)	0.09 (0.08, 0.10)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.04 (0.03, 0.05)	0.04 (0.03, 0.05)	0.005 (-)
F	2	0.01 (-)	0.11 (0.03, 0.20)	0.02 (0.01, 0.04)	2.98 (0.09, 5.87)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.03 (-)	0.42 (0.07, 0.77)	1.31 (0.03, 2.61)	0.005 (-)
Total	15	0.05 (0.01, 0.45)	3.12 (0.01, 22.72)	0.22 (0.01, 2.10)	1.09 (0.01, 5.87)	0.05 (0.01, 0.52)	0.05 (0.01, 0.39)	0.02 (0.01, 0.04)	1.09 (0.00, 8.75)	0.59 (0.00, 2.83)	0.06 (0.00, 0.48)
TWA	MOEL ¹⁾	1000	500	200	50	50	1	50	50	400	10
TLV	ACGIH ²⁾	1000	500	200	50	50	0.5	20	50	400	10

¹⁾MOEL TWA TLV, Time-Weighted Average Threshold Limit Value set by Ministry of Employment and Labour, Korea, 2010

²⁾ACGIH TWA TLV, Time-Weighted Average Threshold Limit Value set by American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010

한 결과는 Table 4와 5에 나타나 있다. 주로 사용하는 10개 화학물질을 대상으로 하였고 구해진 값들은 우리나라 고용노동부 및 미국 ACGIH에서 제정한 기준과 비교하였다. 전체적으로 기준을 초과한 곳은 없었고 비교적 낮은 농도 분포를 보였다. 이는 실험실의 특성상 지속적이고 상시적인 작업이 거의 없으므로 설사 연구활동종사자가 고농도에 일시적으로 노출이 된다고 해도 거의 노출되지 않은 시간의 농도로 상쇄되어 그 영향이 나타나지 않은 것으로 보인다. 지역 시료와 개인 시료의 평균값의 추이는 거의 비슷하였다.

우선, A 실험실의 경우 아세톤의 농도가 가장 높았는데 아세톤은 주로 세척에 사용되고 작업은 수시로 실시되고 있었다. 세척조에 후드가 설치되어 있지 않으며 작업 시에는 개방한 채로 사용하므로 세척 작업 시 실험실 내에 전반적으로 아세톤이 퍼지는 것으로 파악된다. 특히, 벤젠은 ACGIH 기준이 0.5 ppm인데 해당 실험실의 개인 TWA가 평균 0.27 ppm으로 절반 이상이었고 최대값은 0.34 ppm까지 나타났다. 기타 실험실에서는 벤젠이 거의 검출되지 않았다는 점을 감안할 때 비교적 높은 수치를 보이고 있었다. 그 밖에도 노말헥

산과 클로로포름이 다른 실험실들에 비해 많이 검출되기는 하였으나 기준의 약 5 ~ 20% 정도였다. 추출 실험이 주요 작업인 F 실험실의 경우, 디클로로메탄의 평균 농도가 24.21 ppm으로 가장 높게 나왔고 이 또한 우리나라 고용노동부나 ACGIH 기준인 50 ppm의 절반 정도로 비교적 높은 농도를 보였다. 추출에 사용하는 물질은 여러 가지가 있으나 F 실험실의 경우 디클로로메탄을 주로 사용하고 있었고 실험 특성상 연구활동종사자가 장비를 세팅한 후 추출 실험이 끝나기까지 20 ~ 30분의 시간이 소요되어 그만큼 노출이 커지는 것으로 판단된다.

기존 연구에서도 실험실에서 수행한 노출 평가 결과 화학물질 농도는 우리나라 고용노동부나 ACGIH TLV에 크게 못 미치는 것으로 나타났다(김명신, 1996; Yu-Mei 등, 1999; 유계목 등, 2000; 하주현 등, 2010). Yu-Mei 등 (1999)의 연구에서 대학의 화학실험실 연구활동종사자를 대상으로 주요 사용 화학물질에 대한 개인 시료를 채취한 결과 대부분이 ACGIH-TLV 단시간노출기준에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다. 최근 하주현 등 (2010)의 연구에서도 국내 정부출연 연구기관

Table 5. Distributions of time-weighted average concentrations of 10 chemicals in six laboratories (personal samples)

Lab.	No	time-weighted average concentrations [Mean (min, max)] (unit: ppm)									
		ethanol	acetone	2-propanol	dichloro-methane	tetra-hydrofuran	benzene	toluene	n-hexane	ethyl acetate	chloroform
A	4	0.01 (-)	36.38 (22.00, 56.71)	0.15 (0.01, 0.41)	5.23 (3.72, 6.57)	0.24 (0.11, 0.45)	0.27 (0.13, 0.34)	0.04 (0.02, 0.07)	9.12 (5.71, 16.95)	3.50 (1.91, 6.53)	0.57 (0.25, 1.18)
B	5	0.07 (0.01, 0.30)	0.60 (0.01, 0.93)	2.66 (0.23, 10.06)	0.25 (0.01, 0.78)	0.01 (-)	0.01 (0.01, 0.02)	0.03 (0.02, 0.06)	1.80 (0.69, 3.33)	0.86 (0.09, 3.05)	0.11 (0.00, 0.28)
C	4	0.01 (-)	1.28 (0.01, 3.58)	0.01 (-)	0.06 (0.01, 0.21)	0.01 (0.01, 0.02)	0.01 (0.01, 0.02)	0.01 (0.01, 0.02)	0.73 (0.04, 1.48)	0.08 (0.03, 0.18)	0.01 (-)
D	5	0.01 (-)	0.02 (0.01, 0.06)	0.58 (0.03, 1.26)	1.79 (0.01, 4.79)	0.49 (0.09, 0.91)	0.01 (0.01, 0.03)	0.03 (0.01, 0.06)	0.34 (0.00, 0.89)	0.72 (0.00, 1.90)	0.01 (-)
E	4	0.07 (0.02, 0.12)	0.76 (0.33, 1.47)	0.43 (0.06, 1.35)	0.23 (0.15, 0.35)	0.02 (0.01, 0.05)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.45 (0.11, 0.98)	0.12 (0.08, 0.16)	0.01 (-)
F	5	0.04 (0.01, 0.08)	0.69 (0.38, 1.14)	0.01 (-)	24.21 (9.25, 35.17)	0.01 (-)	0.01 (-)	0.05 (0.02, 0.06)	1.94 (1.22, 3.24)	9.30 (3.66, 12.53)	0.01 (-)
Total	27	0.03 (0.01, 0.30)	5.93 (0.01, 56.71)	0.69 (0.01, 10.06)	5.68 (0.01, 35.17)	0.13 (0.01, 0.91)	0.05 (0.01, 0.34)	0.03 (0.01, 0.07)	2.28 (0.00, 16.95)	2.56 (0.00, 12.53)	0.11 (0.00, 1.18)
TWA	MOEL ¹⁾	1000	500	200	50	50	1	50	50	400	10
TLV	ACGIH ²⁾	1000	500	200	50	50	0.5	20	50	400	10

¹⁾MOEL TWA TLV, Time-Weighted Average Threshold Limit Value set by Ministry of Employment and Labour, Korea, 2010

²⁾ACGIH TWA TLV, Time-Weighted Average Threshold Limit Value set by American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010

및 대학교 실험실 내에서 발생하는 아세톤, 에탄올, 톨루엔, 노말헥산, 크실렌, 에틸에테르, 클로로포름, 에틸아세테이트 및 이소프로필알콜 등에 대해 본 연구와 동일한 방법으로 지역 샘플링을 한 결과 모든 시료가 노출 기준에 미달하였다고 보고한 바 있다. 다만, 클로로포름 등이 비교적 높은 농도를 보인 한 실험실의 경우는 흡 후드의 제어 풍속이 유지 기준에 비해 낮았고 따라서 이것이 원인이라고 제시하였다. 본 연구에서는 A와 F 실험실의 실험량이 다른 연구실보다 많았고 특히 결과에 제시하지는 않았으나 흡 후드의 성능이 전반적으로 기준에 크게 못 미치는 수준이었으며 (약 0.18 ~ 0.30 m/s) 개구부를 절반 이상 개방해두고 있었다. 이는 실험이 흡 후드 내에서 이루어지고 있다고 해도 화학물질이 흡 후드로부터 실험실 내로 유입되어 확산될 가능성이 크다는 것을 의미하고 따라서 연구활동종사자들의 개인 노출에도 큰 영향을 주는 것으로 분석된다. 우리나라 일부 화학실험실에 설치된 흡 후드의 상당 부분이 기준에 못 미친다는 연구결과 (이한주, 1995; 유계목 등, 2000) 들을 감안할 때 이 부분에 대한 개선이 필요하다.

Figure 3은 각 실험실의 실험량에 따라 주요 화학물질의 개인 시료 중 8시간 시간가중치의 평균 농도를 비교한 것이다. 본 연구의 대상이 되는 6곳의 실험실은 사용하는 화학물질의 양과 사용실태 등을 근거로 하여 고, 중, 소의 세 부류로 나눌 수 있었다. 즉, A와 F 실험실은 실험량이 고 (high), D와 E는 중 (medium), 그리고 B와 C는 저 (low) 등급에 속했고 이는 연구활동종사자 면담 및 실험실 방문조사 등을 통하여 산업위생전문가가 결정하였다. Figure 3에서 나타나듯이 주로 사용하는 화학물질 7종에 대해 그 평균 농도를 실험량에 따라 비교한 결과 실험량이 많은 실험실일수록 기타의 실험실들에 비해 화학물질 농도가 통계적으로 유의하게 높았다. 테트라하이드로퓨란의 경우는 예외적으로 실험량이 중 등급에 속하는 실험실들의 농도가 더 높았으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 특히, 디클로로메탄 ($p < 0.01$) 이나 벤젠 ($p < 0.05$) 등과 같은 발암물질의 경우 실험량이 가장 많은 실험실에서 평균 농도가 15.78 ppm, 0.13 ppm이었으나 실험량이 가장 낮은 실험실은 0.17 ppm, 0.01 ppm으로 약 10 ~ 100배의 차이를 보이고 있었다. 이는 실험량이 많을수록 연구활동종사자의

노출 농도도 상대적으로 높으며, 즉 그 물질을 직접 사용하지 않더라도 실험실에 머무는 시간이 길수록 노출이 더 될 수 있고 흡 후드 등을 활용하여 실험한다고 해도 연구활동종사자의 노출은 지속적으로 일어날 수 있음을 나타내고 있다. 그리고 이미 입증된 발암물질의 경우 이러한 경향에 대해 주의를 할 필요가 있다. 반면, 기존의 연구에서 Yu-Mei 등 (1999)은 화학실험실에 대한 실험실간 농도 차이가 통계적으로 유의하지 않다고 보고하였다.

실험실의 특성상, 즉 단시간 간헐적 작업이 많고 연구활동종사자들이 실험을 하지 않는 동안 문헌 리뷰 등을 하는 경우 개인에게 장비를 부착하여 하루 종일 측정하는 것은 매우 부담스러운 일이다. 따라서 대부분의 노출 평가 연구에서는 실험실 여러 군데에 장비를 설치하여 지역 샘플링을 하는 것이 일반적이다 (하주현 등, 2010; 김명신, 1998). 그러나 개인의 행동에 따른 노출 정도를 파악하는 것이 건강 영향과의 연관성을 보기 위해서는 더 적합한 자료이기 때문에, 본 연구에서는 지역 시료와 개인 시료를 동일한 시간대에 함께 측정을 하여 두 시간가중평균농도의 상관성을 비교하였다 (Figure 4). 지역 시료의 경우는 한 실험실에서 측정된 지점 모두에 대해 평균을 계산하였고 이를 실험실의 각 개인 자료와 일치시켰다. 결과에서 보듯이, R^2 이 약 0.70으로 상관성이 어느 정도 있는 것으로 나타나기는 하나 지역 시료의 위치나 실험실 상황에 따라 과소 혹은 과대평가가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 노출 평가 자료가 개인의 노출과 질병 혹은 증상과의 연관성을 파악하여 건강 영향을 파악하기 위한 기본 자료로서 제공된다는 점을 미루어볼 때 지역 시료는 개인 노출을 구체적으로 파악하는 데에 있어서는 부적합할 수 있음을 시사한다. 아울러, 위 그래프에서 기울기가 0.27로 개인 시료의 측정치(x축)가 장소시료(y축)보다 높은 농도에서 더 큰 농도를 보이고 있음을 주목할 필요가 있다. 따라서 실험실에서 고농도 노출작업은 개인 시료 측정값이 높은 농도를 보이고 있다.

4. 작업별 단시간노출 평가

실험실 노출 평가에서 가장 간과되고 있는 것이 연구활동종사자들의 단기간 노출에 대한 문제이다. 장시간 지속적으로 노출이 되는 것이 아니라 실험 과정에 따라 주로 단시간 간헐적으로 작업이 이루어지므로 총 노출시간에 대비한 정량적 노출 평가로는 과소평가할 우려가 있다. 그러나 연구활동종사자들은 잠깐씩 화학물질에 노출되기 때문에 그 유해성을 제대로 인식하기 힘들고 연구 업무를 수행하는 중에 개인에게 단시간 노출 평가를 실시하는 것은 측정자에게도 곤혹스러운 일이다. 그럼에도 불구하고 적지 않은 역학 연구들

에서 화학실험실 종사자와 각종 건강 영향에 대한 상관성을 입증한 바 있고 따라서 이러한 단시간 노출 평가를 어떤 식으로 접근해야 가장 적합하고 구체적인 데이터를 얻을 수 있을까에 대한 고민이 필요하다. 본 연구에서는 산업위생학에서 일반적으로 사용하고 있는 단시간 노출 평가의 방법, 즉 20분 미만의 작업이 이루어질 경우 별도의 측정 장비를 연구활동종사자에게 개별적으로 부착시키고 측정을 한 후 우리나라 고용노동부와 미국 ACGIH의 단시간노출기준 (Short-Term Exposure Level, TLV-STEL)과 비교하는 방법을 취하되, 주요한 작업들을 구분하는 데에 좀 더 중점을 두었다.

각 사업장마다 차이가 있을 수는 있겠지만 대부분의 제조업종은 공정과 작업이 명확하여 직무나 작업을 구분하는 것이 비교적 용이한 반면에, 실험실은 매우 다양한 실험들이 하루에 한꺼번에 수행되는 경우가 많으므로 이를 몇 개의 작업으로 나누고 동일 노출군으로 분류하는 것은 쉽지 않은 일이다. 다행히 본 연구의 대상 실험실들이 대부분 화학물질의 분석 및 정제 실험에 치중하고 있었고 각 연구활동종사자들의 실험 내용이 잘 구분되어 있어서 비슷한 실험을 수행하는 주요한 군으로 5가지를 선택할 수 있었다. 여러 역학 연구들에서는 노출 평가와의 연관성을 볼 때 세부 작업으로 구분하기보다는 연구활동종사자의 직무군으로 나누는 경우가 많다. 예를 들어, Henn 등 (2007)의 연구에서는 각 직무군을 실험실 분석가, 실험실 보조, 실험실 기술보조, 생화학자, 실험실 감독자 등의 18개 군으로 나누어 각각의 직무군에 가중치를 주고 평가를 실시하였다. 그러나 우리나라 대부분의 실험실에서는 직무군이 이처럼 명확하게 나누어져 있지 않고 한 연구활동종사자가 다양한 업무를 소화하는 경우가 많기 때문에 주로 하는 실험별로 나누는 것이 더 적합한 것으로 판단하였다. Apostoli 등 (1996)의 연구에서도 특정한 화학물질의 노출 평가를 위해 개별 분석 기술에 따라 구분하는 것이 바람직하다고 제안하고 있다.

주요 작업은 세척, 합성, 정제, 증발, 추출이었고 나머지 소소한 작업들은 기타로 묶었다 (Table 6). 세척은 실험에 사용한 각종 초장기를 유기용제 (아세톤이나 이소프로필알콜 등)를 이용하여 씻어내는 것이고 합성은 기본 유기용제를 이용해 새로운 물질을 합성하는 것을 의미한다. 정제는 최종적으로 만들어진 생산물을 노말헥산이나 벤젠 등으로 씻어내는 것이고 증발은 합성시킨 중간 생산물에 열을 가하여 필요 없는 유기용제를 공기 중으로 기화시키는 작업이다. 마지막으로 추출은 유기용제의 녹는 성질을 이용하여 재료에서 필요한 물질을 뽑아내는 작업이다. 기타의 재결정이나 여과 등은 각 실험실에서 매우 드물게 혹은 매우 짧은 시간 동안만 일어나는 작업이었다. 전 작업에서 주로 사용되거나 건강 유해성이 높은 물질인 아세톤, 디클로로메탄, 벤젠, 노말헥산, 에

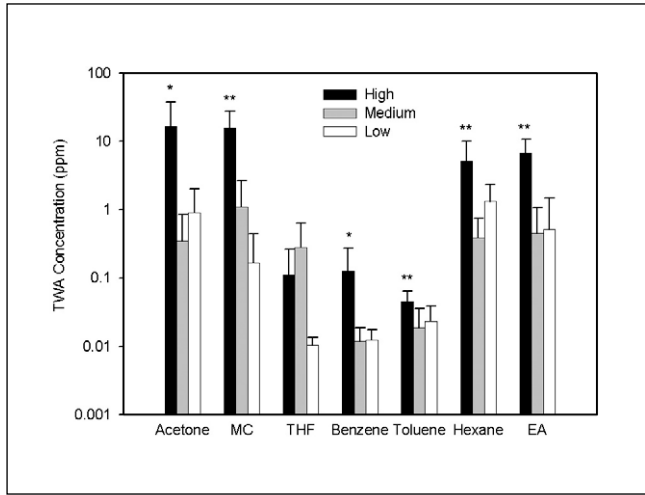


Figure 3. Distribution of personal TWA concentrations by workload among laboratories. (MC, dichloromethane; THF, tetrahydrofuran; EA, ethyl acetate)
 * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

틸아세테이트에 대해서만 분석하였다.

작업별 단시간노출농도가 가장 높게 나온 작업은 세척이었다. 세척은 다량의 유기용제를 세척조에 담아두고 개방한 채 작업을 하거나 유기용제를 초자기에 수동으로 흘려보내면서 일일이 작업을 하기 때문에 연구활동종사자들의 노출 가능성이 가장 높았다. 주로 사용하는 유기용제인 아세톤은 평균 농도가 37.10 ppm이었고 디클로로메탄은 29.37 ppm이었다. 그 밖에 에틸아세테이트가 14.97 ppm으로 높은 편이었다. 정제의 경우는 주로 사용하는 화학물질인 노말헥산의 평균 농도가 7.62 ppm으로 다른 작업에 비해서 상대적으로 높은 편이었고 아세톤이 17.30 ppm으로 높게 나왔다. 흡 후드 근처에 폐액통을 두고 세척 작업을 그 위에서 직접 수행하는 경우가 있어서 세척 작업 시 발생한 아세톤이 근방에서 정제 작업을 하는 연구활동종사자에게 영향을 미친 것으로 생각된다. 이는 단일한 좁은 실험 공간 내에서 여러 가지 실험이나 작업이 한꺼번에 이루어질 때 직접 사용하지 않더라도 서로에게 간접적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 입증하는 것이고 특히 실험실의 경우 양압이 형성되어 있으므로 공기의 흐름이 외부에서 내부를 향하고 있으며 따라서 입구 쪽에서 세척 작업을 할 경우 발생한 유기용제가 흡 후드 방향으로 이동하는 것으로 파악된다.

추출의 경우, 가장 많이 사용하는 물질은 디클로로메탄이었고 따라서 가장 높은 평균 농도인 17.77 ppm을 보였다. 정제나 추출 실험은 연구활동종사자가 그 실험을 처음부터 끝까지 옆에서 지켜보기 때문에 사용하는 유기용제에 대한 노출 정도가 컸던 반면에, 합성이나 증발 실험은 일단 장치를

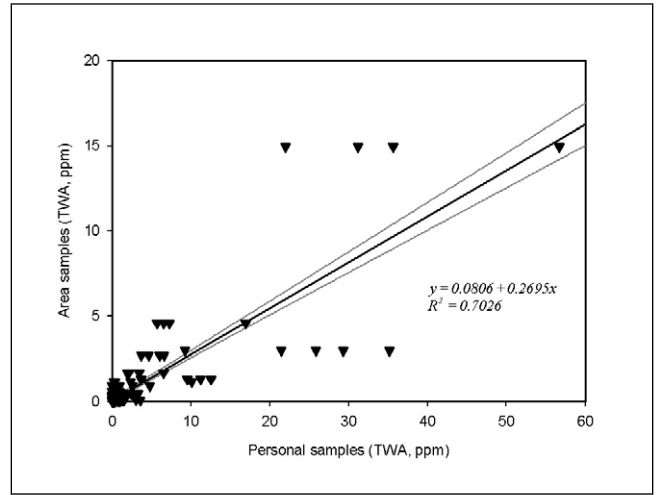


Figure 4. Correlation on average concentrations between area and personal samples in six chemistry laboratories.

걸어두고 문헌리뷰를 하는 등 다른 곳으로 이동하는 경우가 대부분이어서 전반적으로 연구활동종사자의 노출 정도가 낮은 편이었다. 전체적으로 가장 큰 농도를 보인 것은 아세톤과 디클로로메탄으로 각각 평균이 10.94 ppm, 10.21 ppm이었다. 발암물질인 벤젠은 사용 빈도나 사용량이 많지 않아 거의 나타나지 않는 정도이나 정제의 경우 실험에서 사용하는 경우가 간혹 있어서 0.69 ppm의 농도로 다른 작업에 비해서는 높은 농도를 보였다. 이는 단시간노출기준인 5 ppm의 10% 미만인 낮은 농도였으나 최대값은 2.20 ppm으로 기준의 절반 정도 수준으로 나타났다.

각 작업의 개인의 8시간 TWA와 단시간노출농도의 범위를 물질별로 비교하였다. 이는 실험 작업의 특성상 하루 작업 시간동안 TWA를 대표값으로 했을 경우 각 단일 작업에서 고농도로 노출되는 패턴을 상쇄할 우려가 있기 때문에 과연 각 물질별 TWA가 각 작업의 단시간노출농도를 어느 정도 반영하는가를 알아보기 위해서 분석한 것이었다. Figure 5에서 나타나듯이 각 작업에서 연구활동종사자들이 고농도로 노출되는 주요 물질의 농도 범위를 각 물질의 TWA 범위가 포괄하고 있지 못함을 알 수 있다. 즉, 사용하지 않거나 사용량 혹은 사용 빈도가 낮은 물질의 발생 정도는 포함하고 있어도 각 작업의 주요 사용 화학물질의 노출 범위는 TWA만으로는 예측하기가 힘들다. 이는 제조업종과 다르게, 공정의 흐름이 없고 각 작업마다 고유하게 사용하는 화학물질들이 있으며 그 사용량이나 빈도, 시점이 일정하지 않은 실험실이라는 공간 내에서의 대표적인 노출 평가 결과로서 TWA만으로는 부족하다는 것을 나타낸다. 또한, 연구활동종사자들의 실제 유기용제 노출은 개인적으로 수행하는 작업의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 실험실에서의 정량적 노출 평가

Table 6. Distribution of short-term exposures by tasks

#	task	task description	main chemicals used	average task duration (min)	n	concentrations [Mean (min, max)] (unit: ppm)				
						acetone	dichloro-methane	benzene	n-hexane	ethyl acetate
1	rinsing	washing the laboratory glassware with some chemicals	acetone, dichloromethane, isopropyl alcohol	13	8	37.10 (0.01, 168.56)	29.37 (0.01, 194.88)	0.20 (0.01, 0.58)	4.99 (0.00, 17.84)	14.97 (0.00, 90.46)
2	synthesis	producing a compound by a chemical reaction from simpler raw materials	tetrahydrofuran, toluene	14	5	0.58 (2.01, 2.87)	0.01 (-)	0.20 (0.01, 0.22)	1.37 (0.00, 2.21)	0.28 (0.00, 0.71)
3	refinement	refining or purifying a substance by distillation	n-hexane, benzene, ethyl acetate	15	7	17.30 (0.01, 63.55)	2.76 (0.01, 7.15)	0.69 (0.01, 2.20)	7.62 (0.00, 19.24)	3.07 (0.00, 5.40)
4	evaporation	applying heat to change some chemicals from a liquid to a gas	tetrahydrofuran, ethyl acetate, toluene, dichloromethane	10	5	3.50 (0.01, 9.53)	0.76 (0.01, 3.72)	0.23 (0.01, 0.45)	5.48 (0.00, 9.49)	1.93 (0.12, 2.89)
5	extraction	extracting one material from another one by washing with a solvent to remove adsorbed materials from an adsorbent	dichloromethane, ethyl acetate, n-hexane	15	8	0.55 (0.01, 2.00)	17.77 (0.01, 76.61)	0.04 (0.01, 0.27)	1.21 (0.00, 2.78)	5.34 (0.07, 20.37)
6	others	recrystallization, filtering, bottling off solvents	n-hexane, acetone, dichloromethane	15	8	0.74 (0.01, 4.79)	2.29 (0.01, 15.84)	0.01 (-)	1.05 (0.00, 8.05)	0.92 (0.00, 6.17)
7	Total	-	-	-	41	10.94 (0.01, 168.56)	10.21 (0.01, 194.88)	0.20 (0.01, 2.20)	3.55 (0.00, 19.24)	4.94 (0.00, 90.46)
RV ¹⁾	TLV	MOEL	-	-	-	750	-	5	-	-
RV ²⁾	STEL	ACGIH	-	-	-	750	-	5	-	-

¹⁾MOEL TLV STEL, Threshold Limit Value Short-Term Exposure Level set by Ministry of Employment and Labour, Korea, 2010

²⁾ACGIH TLV STEL, Threshold Limit Value Short-Term Exposure Level set by American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010

는 지역 시료나 개인의 하루 시간가중평균노출농도로만 나타내기보다는 실험 특성에 맞는 단위 조작 구분을 통해 좀 더 구체적으로 접근하는 것이 개인 노출에 대한 프로파일을 그리는 데에는 더 적합할 것이다.

연구활동종사자의 노출 패턴을 설명하고 이를 건강 영향과의 역학 조사에 활용하기 위해서는 지역 시료보다는 개인 시료를, 개인의 전작업시간 시간가중노출농도보다는 작업별 단시간노출농도를 측정하여 접근하는 것이 타당하다. 또한 제조업에 일반적으로 적용되는 획일적인 측정 방법을 실험실에 그대로 적용하기보다는 실험 작업의 개별적 특성을 반영할 수 있는 실시간 측정방법 등을 다양하게 활용하는 것이 바람직하다.

본 연구에는 여러 가지 한계점이 있었다. 첫째는 복잡하고 다양한 여러 실험들을 대상으로 하였으나 정작 측정은 1일 1

회만 수행하여 대표값으로서의 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해서 사전에 조사자들이 각 실험실의 실험 내용에 대해 숙지를 했고 가장 일반적인 패턴으로 실험실이 운영되는 때에 측정할 수 있도록 미리 조율을 하였다. 또한 단시간노출 농도를 측정함으로써 실험실 전반적인 상황은 바뀔 지라도 개인이 각자의 실험을 하는 동안의 노출 농도는 크게 달라지지 않을 것이라고 가정하였다. 둘째는 실험 내용을 연구활동종사자들의 개인 기억에 의존한 시간활동일지를 토대로 분석하였기 때문에 회상 편견 (recall bias)이 발생할 우려가 있었다. 이를 최소화하기 위하여 각 조사자가 계속 실험실에 상주하면서 실험실 내에서 일어나는 행동들을 교차 조사하였고 지속적으로 연구활동종사자에게 확인하는 작업을 거쳤으며 이후 시간활동일지와 비교 분석하였다. 마지막으로 실험실에서는 다양한 실험이 한꺼번에 일어나고 있고 다양한

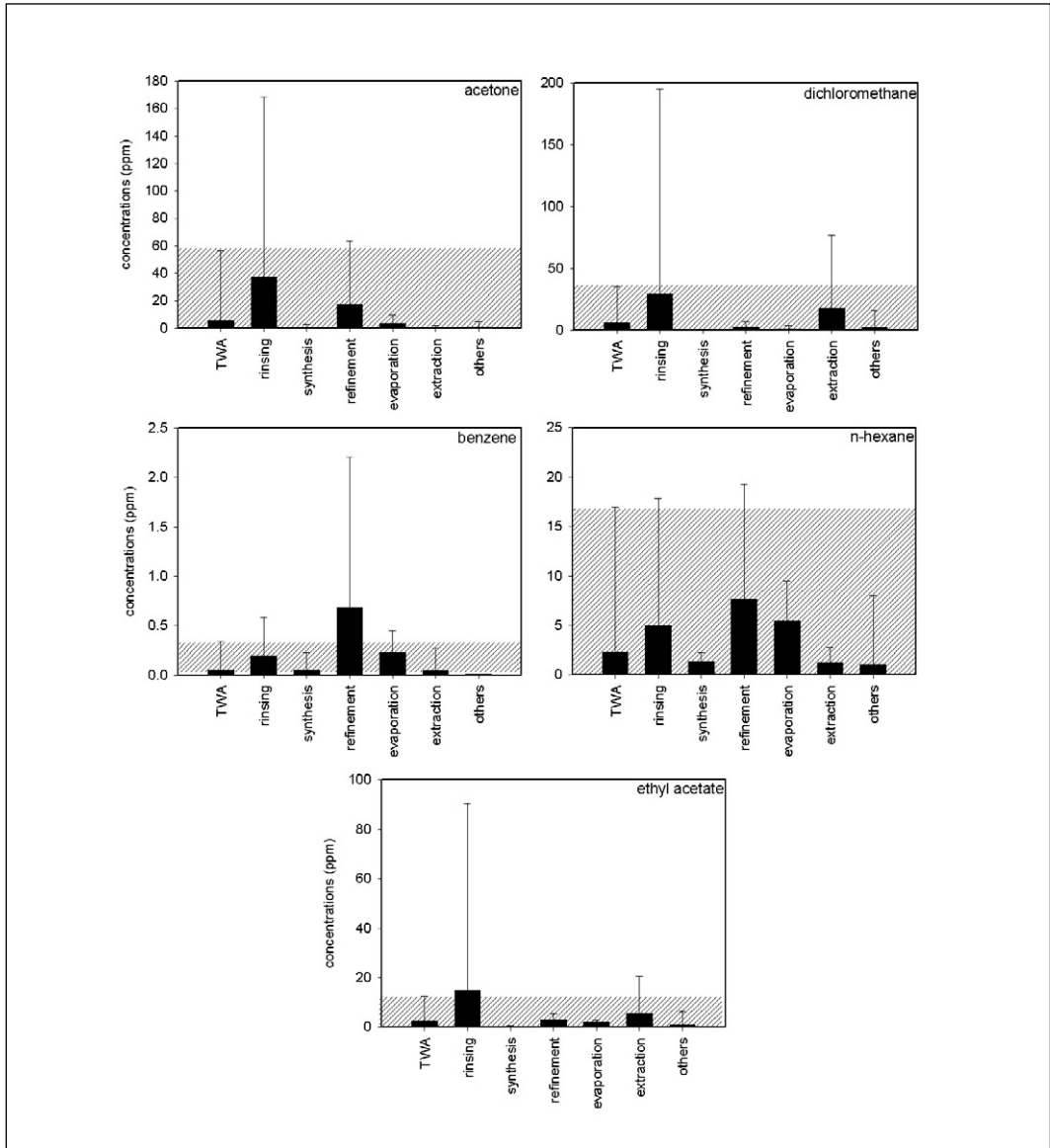


Figure 5. Comparison on concentrations between TWA and short-term exposure level by task. The vertical bars and shaded areas stand for maximum levels and their confidence limits. Black bars stand for mean concentrations of chemicals.

화학물질들을 사용하기 때문에 연구활동종사자들은 단일 물질에 의한 노출보다는 오히려 복합 노출로 인한 영향을 많이 받을 수 있다. 본 연구에서는 각각의 단일 물질 노출로부터 다른 작업으로부터의 영향을 예측하기는 하였으나 이에 대한 분석을 심도 깊게 수행 하지 못하였다. 이러한 부분에 대한 보다 깊이 있는 연구가 필요하다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 대학 및 연구기관의 화학실험실 6곳을 대상으로

하여 연구활동종사자들이 노출되는 주요 화학물질의 농도를 다양한 방법으로 정량화하고 그 결과들을 비교하였다. 이를 토대로 기존 전략을 활용하여 실험실에 대한 보다 적절한 노출 평가 전략을 수립하는 데에 기초 자료를 제공하고자 실시하였다. 결과적으로 아래와 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 지역 및 개인 시료 모두 연구활동종사자의 화학물질에 대한 시간가중노출평균농도는 우리나라 고용노동부나 미국 ACGIH의 노출기준에 미달하였다. 실험량이 많을수록 발생하는 화학물질의 농도는 높았고 특히 발암물질인 벤젠과 디클로로메탄이 통계적으로 유의하게 증가하는 추세를 보였다.
2. 같은 실험실 내에서 실험 공간과 연구 공간 간의 TVOCs

농도를 비교해볼 때 실험에 의해 발생하는 화학물질이 연구 공간에까지 영향을 미쳤다.

3. 지역과 개인의 시간가중노출평균농도는 상관성이 있는 것으로 나타났으나 고농도에서는 개인 시료 측정치가 지역 시료보다 더 높은 농도를 나타내었다.

4. 세척, 합성, 정제, 증발, 추출 등 단위 조작별 노출 농도의 경우, 가장 높은 농도를 보인 것은 세척 작업으로 아세톤 및 디클로로메탄의 농도가 높았다.

5. 개인의 시간가중노출평균농도는 고농도의 작업별 단시간노출농도를 반영하지 못하고 따라서 시간가중노출평균농도만을 실험실 공간에서의 노출 농도 대표값으로 활용하는 것은 과소평가의 우려가 있을 뿐 아니라 개인의 노출 패턴을 정확하게 파악하는 데에도 한계를 보인다.

본 연구는 일반 작업장과는 작업 특성이 다른 실험실에서의 노출 평가를 어떻게 할 것인지 전략적 검토를 위한 측정 방법 간의 비교를 수행한 논문이다. 교육과학기술부에서는 '연구실 안전환경조성에 관한 법률'을 제정하였으나 화학물질 노출에 대한 정확한 평가 경험이 부족하거나 가이드라인이 없고, 고용노동부의 작업환경측정 방법은 실험실 특성에 맞는지 평가가 되지 아니하였다. 결과적으로 연구활동종사자의 노출 평가를 어떻게 할 것인지 명확한 결론을 내리지 못하였지만, 본 연구는 실험실 노출 평가에 대한 몇 가지 방법적 특성을 비교하였다는 점에서 그리고 기존의 전통적 작업환경측정 방법에 대한 결과를 제시하였다는 점에서 향후 실험실의 연구활동종사자들에 대한 노출 평가 전략에 대한 연구의 토대를 제공하고 있다. 본 연구에서는 실시간 모니터링 방법, 작업환경측정 방법 중 연속시료채취방법과 단시간 채취방법을 적용하여 보았는데 향후 컨트롤밴딩 등의 정성적 평가 방법, 지표 물질을 이용한 방법, 모델링 등 다양한 노출 평가 방법이 더 연구될 필요가 있다. 작업장과는 다른 실험실 특성에 따른 노출 평가 전략은 연구활동종사자의 노출 양상의 이해, 효과적인 개선 방법의 적용은 물론 연구활동종사자들의 건강상 유해 영향의 원인을 규명하고자 할 때 유용하게 사용될 것이다.

REFERENCES

고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준, 노동부고시 제2010-44호, 2010.
 교육과학기술부. 연구실 안전환경 조성에 관한 법률. 법률 제7425호, 2009.
 김명신, 일부 대학화학실험실에서의 유기용매 노출에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 석사학위논문, 1998.

유계목, 노영만, 한진구, 원정일. 일부 산업보건관련 기관의 분석실험실 안전보건에 관한 실태와 대책. 한국산업위생학회지 2000;10(2):150-164
 이한주. 일부 대학 화학실험실의 안전보건 실태조사. 서울대학교 보건대학원 석사학위논문, 1996.
 하주현, 신용철, 이현석, Samuel Y. Paik, 이광용, et al. 국내 정부출연연구기관 및 대학교 실험실 공기 오염물질 농도 및 환기시스템 평가. 한국산업위생학회지 2010;20(1): 63-69
 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. ACGIH, Cincinnati, Ohio, 2010.
 Apostoli P, Lucchini R, Alessio L. Proposal of a method for identifying exposure to hazardous chemicals in biomedical laboratories. Clinica Chimica Acta 1996;256:75-86
 Bullock WH, Ignacio JS. A strategy for assessing and managing occupational exposures, 3rd ed. American Industrial Hygiene Association Exposure Assessment Strategies Committee. 2006. p51-52
 Haruo H, Toshiaki G, Nobutoyo N, Hidetaka S, Toru T, Shigeyuki K, Koji M. Evaluation of the control banding method-comparison with measurement-based comprehensive risk assessment. J Occup Health 2007;49:482-492
 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;4:71-79
 Hoar SK, Pell S. A retrospective cohort study of mortality and cancer incidence among chemists. J Occup Med 1981;23(7): 485-494
 Kubale T, Hiratzka S, Henn S, Markey A, Daniels R, et al. A cohort mortality study of chemical laboratory workers at Department of Energy Nuclear Plants. Am J Ind Med 2008;51:656-667
 Chang H-Y, Lin Y-M, Hsu P-C, and Guo YL. Reduction of sperm motility in a male laboratory worker exposed to solvents; A case study. Environ Health Perspect 2001;109(7):753-756
 Maher KV, Defonso LR. A historical cohort study of mortality among chemical researchers. Archives of Environmental Health 1986;41(2) March/April
 International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human, IARC, France, 2010
 National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Method No. 1400, 1300, 1005, 1609, 1501, 1500, 1457, 1003.

1994. Available from <http://www.cdc.gov/NIOSH/nmam/pdfs/>
- Saram J, Gurvich R, Kneshet Y. Cancer incidence among laboratory workers in biomedical research and routine laboratories in Israel: Part I-The cohort study. *Am J Ind Med* 2003a;44:600-610
- Saram J, Gurvich R, Kneshet Y. Cancer incidence among laboratory workers in biomedical research and routine laboratories in Israel: Part II-Nested case-control study. *Am J Ind Med* 2003b;44:611-626
- Taskinen H, Kyyonen P, Hemminki K, Hoikkal M, Lajunen K, Lindbohm M-L. Laboratory work and pregnancy outcome, *J Occup Med* 1994;36(3):311-319
- Walrath J, Li FP, Hoar SK, Mead MW, and Fraumeni JF. Causes of death among female chemists, *AJPH* 1985;75(8):883-885
- Wennborg H, Bonde JP, Stenbeck M, Olsen J. Adverse reproduction outcomes among employees working in biomedical research laboratories, *Scand J Work Environ Health* 2002;28:5-11
- Yu-Mei T, Louis D, and Thomas S. Exposure assessment of laboratory students. *App Occup Environ Hyg* 1999;14(8):530-538