

실험실 근무자의 화학물질 노출과 건강 위험

변혜정 · 박정임*[†]

서울대학교 보건환경연구소, *순천향대학교 환경보건학과
(2010. 11. 9. 접수/2010. 12. 1. 수정/2010. 12. 28. 채택)

A Review on Chemical Exposure and Related Health Risks in Laboratory Workers

Hyaeyeong Byun · Jeongim Park*[†]

Institute of Health and Environment, Seoul National University

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

(Received November 9, 2010/Revised December 1, 2010/Accepted December 28, 2010)

ABSTRACT

Researchers who work in science and engineering R&D laboratories are commonly exposed to a wide range of chemical, biological and physical hazards. They also may adopt ergonomically poor postures for long periods of time. These factors may increase the risk of adverse health outcomes in laboratory workers. Recently, there were several fatal accidents in the laboratories in universities and research institutes in Korea. Consequently, the 'Laboratory Safety Act' was enacted in 2006. However, there are concerns about the health risk associated with chronic exposures to hazards, as the management measures provided in this Act are very limited, focusing primarily on accident prevention and compensation for lab work-related accidents. In this article, the methods for assessing exposure to chemicals in laboratory environments are discussed. Also, epidemiological studies examining the association between laboratory exposure and health effects, including cancer and reproductive toxicity are extensively reviewed. Finally, the possible roles of environmental health professionals in this area are suggested, along with a list of critical research needs for properly assessing laboratory workers' exposure and risk.

Keywords: laboratory worker, exposure assessment, health effects, research needs

I. 서 론

과학 기술 분야의 연구 개발은 우리나라의 산업과 경제에 중요한 비중을 차지한다. 이공계 대학 및 관련 연구 기관의 규모나 과학 기술 분야 연구에 대한 투자는 지속적으로 증가하는 추세이다. 2007년 현재 과학 기술 분야의 연구개발비는 30조 2,727억 원이고, 정부의 과학 기술 기본 계획에 따르면 2012년까지 국가 연구 개발 투자를 GDP의 5%까지 확대할 계획이라고 한다. 연구원, 보조 기능원 등을 포함한 연구 개발 인력은 421,549명에 달한다. 연구 개발 인력 중에서 연구원 수는 289,098명으로 약 68.6%를 차지하고 있으며, 이 가

운데 과학 기술 분야에 속하는 연구원은 255,186명으로 전체 연구원의 88.3%에 해당하였다. 연구 개발 주체별로 보았을 때 과학 기술 분야 연구원들의 분포는 기업체가 70.2%(179,154명), 대학이 22.9%(58,419명), 공공 연구 기관이 6.9%(17,613명)로 나타났다. 우리나라 연구 1만 명당 상근상당연구원(Full Time Equivalent, FTE)은 45.8명으로 다른 OECD국들에 비해 높은 편에 속한다.¹⁾ 또한 2009년 교육과학기술부의 보고서²⁾에 따르면 전국의 대학 및 연구 기관 등의 이공계통 연구실험실 수는 총 27,851곳이고 연구실험실에 속한 전체 인력(석·박사급 연구원, 연구원, 연구 보조원 등을 모두 포함)은 약 565,193명인 것으로 나타났다.

그런데, 과학 기술 분야의 연구실험실에는 다양한 종류의 위험이 존재한다. 화재나 폭발, 전기사고로 인한 물리적인 위험부터, 화학물질이나 실험동물 등을 취급하는 활동으로 인한 건강상의 위험, 단순반복작업 등

[†]Corresponding author : Department of Environmental Health Sciences, Soon Chun Hyang University
Tel: 82-41-530-1269, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : jeongim@sch.ac.kr

로 인한 인간공학적 위험까지 그 유해성의 폭은 대단히 넓다. 실험실 근무자들은 대학의 학위 과정동안 그리고 그 이후 전문직 실험실 근무자로서 연구 활동에 종사하는 동안 각종 안전사고 및 건강상의 위험에 노출될 위험이 있다. 그러나 연구 개발 업무와 관련된 위험에 대한 인지도가 낮고, 정해진 시간 안에 성과를 낼 수만 있다면 기꺼이 위험을 감수하려 하기 때문에 위험 가능성을 축소하거나 외면해 온 경향이 있다.

선진국에서는 실험실 근무자의 안전과 건강 보호에 관련한 제도적 조치를 오래전부터 수행해왔다. 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Agency, 이하 OSHA)은 1990년에 산업안전보건법의 일반 의무 조항으로 ‘Occupational Exposure to Hazardous Chemicals in Laboratories’를 제정하여 연구실험실에서 화학물질을 취급하는 실험실 근무자들의 안전 및 보건 관련 사항을 각 대학이나 연구 기관에서 수행할 수 있도록 지침을 마련하였다.³⁾ 이 규정에 따라 각 학교나 기관 등에서는 실험실 안전 계획을 수립하고 화학물질을 사용할 경우 노출 허용기준을 초과하지 않도록 관리함과 동시에 그 결과에 따라 적절한 의학적 감시를 수행하여야 한다. 일본은 대학도 일반 기업과 마찬가지로 노동안전위생법에 따라 화학물질 및 기타 위험 요인을 관리하도록 하고 있다. 호주 또한 산업안전보건법을 근거로 하여 실험실 근무자의 건강과 안전을 위한 실무 지침과 약 100개의 기준을 제정하여 실험실의 위험 요소를 파악하고 체계적으로 관리할 수 있도록 하고 있다.

우리나라에서 과학 기술 분야 연구 환경의 위험성에 관한 우려가 구체적으로 제기된 것은 최근의 일이다. 지난 몇 년간 연구실험실의 화재나 폭발사고로 실험실 근무자들의 사망 및 상해 사고가 잇달아 발생했다. 이에 사회적 관심이 고조되고 연구 환경의 안전을 확보하기 위한 제도적 장치가 필요하다는 공감대가 이루어졌다. 중요한 성과로 2005년 ‘연구실 안전환경 조성에 관한 법률(이하 연구실안전법)’이 제정되었고, 과학기술부에 연구실안전과가 신설되어 2006년부터 법을 집행하기 시작하였다.⁴⁾ 연구실안전법의 주요 내용은 안전관리 규정 작성, 주기적인 안점 점검 및 정밀 안전진단 실시, 사고 피해를 보상할 수 있는 보험 가입, 실험실 근무자(연구실안전법에서는 ‘연구활동종사자’라는 표현을 쓴다)에게 한 달에 한 시간씩 안전 교육 실시, 치명적인 위험에 노출되는 실험실 근무자에 대한 건강 검진 실시, 사고 조사 및 조치 등이다. 최근에는 전국적인 규모의 실태 조사를 2년마다 정기적으로 실시하고, 연구 기관 및 대학마다 연구실 안전관리자를 지정하는 내

용의 법 개정을 추진 중이다.

꾸준히 법령을 정비하고 보완하는 과정에 있으나 여전히 연구실안전법의 대부분은 전기, 가스, 화재, 폭발 등 안전사고 예방 중심의 점검 활동에 치중되어 있다. 실험실 근무자의 건강을 보호하기 위한 노출 평가와 환경 개선에 관련된 내용은 전무하다. 다만 건강과 관련된 내용으로 ‘치명적인 위험에 노출되는 실험실 근무자’에 대한 건강 검진 실시의 의무가 명시되어 있다. 그러나 법령에 명시된 건강 검진은 일반 건강 검진 수준에 지나지 않아 실험실 근무자의 직업성 노출과 연관이 있는 건강 영향 지표를 확인하는 것은 거의 불가능하다. 실제로 2006년 실시한 실태조사 결과⁵⁾를 보면, 대부분의 대학이나 연구 기관에서 안전점검은 수행하고 있는 반면, 실험실 근무자들의 건강 관련 사항 즉 노출 평가와 건강 검진의 실시율은 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

연구실험실에서는 다양한 종류의 화학물질을 동시에 사용하는 경우가 많다. 화학물질의 노출이 당장 그 자리에서 피해를 낳기보다는 오랜 세월을 두고 누적되어 질병으로 나타나기 때문에 화학물질 노출의 위험성을 직관적으로 알아차리기는 쉽지 않다. 그러나 연구실험실에서 주로 사용하는 화학물질에는 발암물질이나 생식독성물질, 돌연변이성 물질 등과 같은 실험실 근무자의 건강에 중장기적으로 치명적인 영향을 줄 수 있는 화학물질들이 포함되어 있다. 또한, 방사선 등의 물리적 유해인자, 그리고 병원성 세균, 바이러스 등의 생물학적 유해인자들도 실험실 근무자들에게 암을 일으키거나 각종 감염성질환을 일으키기도 한다.^{6,8)} 실험실 근무자, 특히 화학실험실 근무자들의 암 사망률이 일반 대중들에 비해 높았다거나 실험실 근무 경험이 있는 여성의 선천성 기형아 출산율이 다른 직업의 여성들보다 높았다는 등의 연구 결과들이 보고된 바 있다.^{7,8)}

연구실험실에서는 다양한 종류의 화학물질을 동시에 사용하는 경우가 많고, 일반 제조업에 비하여 사용량과 빈도가 낮고, 상시적으로 사용하기보다는 필요에 따라 불규칙적으로 사용하는 것이 특징이다. 실험실 근무자는 직무가 명확하게 구분되어 있지 않고 여러 작업을 동시에 하거나 수행하는 연구 과제에 따라 그 작업 내용이 수시로 변경될 수 있다. 즉 연속적인 작업보다는 배치(batch)식의 단위 작업을 중심으로 업무가 수행되고, 각 단위 작업에 소요되는 시간이 비교적 단 시간이다. 또한 대부분의 연구실험실은 공간이 협소하므로 여러 명의 실험실 근무자가 일할 경우 직접 업무를 수행하고 있지 않은 근무자에게까지 노출이 일어날 가능성이 다분하다. 따라서 일반 제조업 공정과 비교

할 때 사용하는 화학물질이 다양하고 작업 내용이 빈번히 달라지므로 일반적인 작업환경 노출 평가에 적용되는 시간가중치 측정 방식으로는 실험실 근무자의 노출을 적절히 평가하기 어렵다. 실제로 실험실 근무자를 대상으로 한 역학 연구에서 연구의 제한점으로 자주 거론되고 있는 점이 실험실 근무자들의 노출 평가 자료가 없다는 점이다. 대부분의 역학 연구에서는 정량적인 노출 평가 대신 실험실 근무자의 업무를 직무로 구분하거나 소규모의 대상 집단에 대해서 취급 화학물질의 종류와 양을 추정하여 건강 영향과의 연관성을 분석했다.

이 고찰의 목적은 이공계 실험실 근무자들의 유해인자에 대한 직업적 노출과 그와 연관이 있는 건강 영향 문제에 관한 연구 성과를 개략적으로 정리하고, 이공계 실험실 근무자들의 건강 보호를 위하여 환경보건 분야에서 기여할 바를 고찰하는 것이다. 이를 위하여 실험실에서 사용하는 화학물질을 중심으로 제한적으로 이루어지기는 하였으나 노출 평가에 사용된 방법과 결과를 소개하였다. 또한 실험실에서의 화학물질 노출과 연관성이 있어 보이는 건강 영향, 특히 발암성과 생식독성 영향을 중심으로 역학 연구 결과를 정리하였다. 끝으로 연구실험실의 환경 노출 평가와 건강 영향 분야의 우리나라 연구 동향을 정리하고 이를 토대로 우리나라 이공계 실험실 근무자들의 건강 보호를 위하여 향후 심도 있는 연구가 필요한 부분을 제안하였다.

II. 연구방법

본 고찰에서는 해외 연구 결과를 정리하기 위하여 1966~2010년까지의 기간을 범위로 하여 PubMed를 검색하였다. 주요한 키워드는 laboratory environment, laboratory workers 및 관련 단어로, 건강 영향을 찾기 위해서 cancer, cancer mortality or morbidity 및 관련 단어, reproductive disease 및 관련 단어, spontaneous abortion, malformation, pregnancy 등을, 노출 평가 부분을 고찰하기 위해서 exposure assessment, occupational risk, organic solvents 등의 검색어를 복합적으로 활용하였다. 검색된 논문의 참고 문헌 중 해당되는 논문들도 별도로 검토하였다. 또한, 유해인자의 범위는 유기용제를 중심으로 하였고 건강 영향의 범위는 발암성과 생식독성으로 한정하였다. 국내 연구 결과를 파악하기 위하여 2개의 관련 학술지를 선택하였다. 한국산업위생학회지는 1990~2010년, 한국환경보건학회지는 2005~2010년까지의 기간을 범위로 하여 각각 검색하였다. 두 저널에서 찾은 논문의 참고 문헌 중 대학

교의 학위 논문은 해당 도서관에서 찾아 검토하였다.

본 고찰에서 인용된 각 값들은 원 논문에 실린 값을 그대로 이용하였고 연구 설계에 따라서 표준화 사망률비(standardized mortality ratio, 이하 SMR), 교차비(odds ratio, 이하 OR), 사망률 교차비(mortality odds ratio, 이하 MOR), 표준화 발병률비(standardized incidence ratio, 이하 SIR), 상대위험도(relative risk, 이하 RR) 등으로 나타내었다. 만약 이러한 값들이 원 논문에는 실리지 않았으나 이후의 리뷰 논문에서 계산된 값들이 있다면 재인용하는 논문의 출처를 별도로 명시하였다. 또한 모든 값들은 1.0 혹은 100을 기준으로 하여 계산되었고 95% 신뢰구간(confidence interval, 이하 CI)을 함께 제시함으로써 각 값들의 비교를 가능하게 하고 연구 결과의 신뢰도를 높였다.

III. 연구실험실의 화학물질 노출 평가

연구실험실에 대한 노출을 평가하는 방법으로 최근의 경향은 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 실제 사용하는 화학물질에 대한 실험실 근무자의 노출 패턴을 정량적으로 측정하여 이를 직무와 연관시켜 상관성을 보는 것이고, 또 하나는 컨트롤밴딩(control banding) 등과 같이 사용하는 화학물질의 종류 및 특성, 사용량 등에 대한 기초적인 자료를 토대로 위험성을 추정하는 것이다. 본 고찰에서는 이 두 가지 방법 모두에 대해서 간단히 검토해보고자 한다.

1. 정량적 노출 평가

정량적인 노출 평가는 기존의 산업보건적인 접근 방법에 의거하여 다양한 접근법들이 시도되어 왔다. 연구실험실 전반의 노출 정도를 파악하기 위해 작업 시간 동안 지역 시료를 채취하거나 개인의 하루 동안 노출 정도를 파악하기 위해 개인 시료를 채취하여 8시간 시간가중평균치를 구하는 것이 일반적이었다. 그러나 연구실험실의 특성상 실험실 근무자의 직무보다는 단위 작업에 따라 동일한 노출 패턴을 보일 가능성이 크다는 점에 착안하여, 8시간 시간가중평균치를 구하는 대신, 개인이 단위 작업을 수행할 때 개인 시료를 단시간 동안 채취하고 이에 영향을 주는 요인들을 분석하는 방법을 활용하는 경향을 보이고 있다. 그러나 아직까지는 연구실험실에 적합한 노출 평가 방법을 모색하는 단계라고 할 수 있다.

Apostoli 등⁹⁾은 일부 생의학 연구실험실에 대해 전통적인 산업위생의 측정 전략을 따라서 위험 인식, 분류, 주기적인 노출 평가 및 영향 요인 분석 등을 수행하였

다. 평가 결과, 무기화합물(중금속)의 경우 노출기준을 초과한 경우는 없었고 유기용제의 경우는 가장 높은 곳이 준비실이었으며 일부 기준을 초과하는 물질도 있었다고 보고한 바 있다. 무엇보다 실험실 근무자의 건강 영향과 화학물질 노출 간의 상호관계를 밝히기 위해 적절한 노출 데이터가 필요하다고 강조하였다.

Julien 등¹⁰⁾은 미국 MIT의 연구실험실 12곳을 대상으로 개인 및 지역 샘플링을 한 결과 한 곳의 메틸렌클로라이드 농도가 노출기준을 초과하였다고 했다. Miller¹¹⁾은 5곳의 지질공학 연구실험실에서 호흡성분진과 호흡성석영을 57개의 단위 작업별로 채취하였고 이중 7%는 OSHA-PEL(Permissible Exposure Limits)을, 18%가 NIOSH-REL(Recommended Exposure Limits)을, 12%가 ACGIH의 상한 기준(excursion level)을 초과하였다고 밝혔다. 이 연구 결과에서는 8시간 노출 평가 수행의 문제점을 지적하고 특정 단위 작업(task)의 노출 평가, 노출에 영향을 주는 작업 습관 및 환경 조건의 파악 등을 망라한 단위 작업 중심의 노출 평가 전략(task-based exposure assessment strategy)을 수행해야 한다고 강조하고 있다. Kretchman¹²⁾은 연구실험실의 작업을 자세히 관찰하면 일상적인 작업을 찾을 수 있으므로 이를 대상으로 유사노출그룹(similar exposure group, SEGs)에 대한 노출 평가를 실시하고 그 결과를 발전시켜 유사 연구실험실에 적용하는 것이 가능하다고 제시한 바 있다. Henn 등¹³⁾은 미국 에너지부(Department of Energy, DOE) 4곳의 연구소에서 1943년부터 1998년까지 근무한 6,157명에 대한 코호트 연구에서 기존의 공기 시료 분석 결과에 근무 시간과 직무 내용에 따른 가중치를 주어 화학물질의 노출 정도를 추정하여 코호트 사망률과의 상관성을 분석하였다. 이는 산업위생 관련 노출 평가 결과가 부족한 현실에서 역학 조사를 실시하기 위한 적절한 방법이라고 제시하였다.

2. 정성적 노출 평가

화학물질의 종류가 급증하고 취급 방법도 다양해지고 있기 때문에 전통적인 노출기준 초과 여부를 중심으로 한 정량적 노출 평가는 한계가 있다고 보고 좀더 단순하고 효과적인 위험성평가 방법으로 제시된 것이 컨트롤밴딩(control banding) 전략이다.¹⁴⁾ 이러한 개념은 영국 HSE(Health and Safety Executive)에서 개발한 Control of Substances Hazardous to Health (COSHH)에서 비롯되어 현재 유럽과 미국에서 점차 확대 적용되고 있는 추세이다. 다품종 소량의 화학물질을 간헐적으로 불규칙하게 사용하는 연구실험실의

경우에도 적용하기에 타당하다는 연구 결과가 보고되고 있다.

Hashimoto 등¹⁵⁾은 일본 정유회사의 작업 장소 12곳에 대해서 컨트롤밴딩 전략과 정량적 노출 평가 방법을 모두 적용하여 비교하였고 이 중에는 실험실의 세척 작업이 포함되어 있었다. 결과적으로 컨트롤밴딩 방법이 실제보다 과대평가하는 경향이 있다고 밝혔고 따라서 정량적 노출 평가 방법에 앞서서 스크리닝하는 단계로 활용할 것을 제안하였다. 최근 나노 물질을 취급하는 작업장에 컨트롤밴딩 전략을 적용하는 사례가 보고되었다. Paik 등¹⁶⁾은 미국 에너지부 산하 연구소 2곳에 있는 나노 기술 관련 연구실험실 5곳에 대해서 컨트롤밴딩 전략을 적용한 바 있다. 이 연구에서 나노 기술 관련 연구실험실에 대한 컨트롤밴딩의 활용은 매우 긍정적인 것으로 평가하였고 따라서 향후에도 지속적으로 확대 적용할 것을 제안하였다. 연구실험실에 대한 정성적 노출 평가 방법, 예를 들어 컨트롤밴딩과 같은 방법은 이제 시작 단계로서 기존의 노출 평가 방법에 보완적으로 활용하면 연구실험실 환경의 효율적인 관리에 도움이 될 것이다.

IV. 실험실 근무자의 직업적 노출과 건강영향

1. 발암성

Table 1은 실험실 근무자들의 화학물질 및 기타 유해인자 취급과 발암의 연관성을 연구한 논문들의 결과이다. 실험실 업무와 신체 특정 부위의 암은 어느 정도 유의한 상관관계가 있거나 증가하는 경향을 보인다는 연구 결과이다. 즉, 실험 업무에 종사했던 사람들에게는 림프 및 조혈계통암,^{17-19,21-23,31)} 악성 흑색종,^{6,20,25,29-31,34,52)} 췌장암,^{17,20,21,24,27)} 전립선암,^{6,20,22,53)} 위장관암,^{20,21,26,30)} 유방암,^{6,21,30,31)} 자궁암,^{6,21)} 뇌암,^{19,26,27,30,54)} 비노생식기암,⁵⁵⁾ 갑상선암,⁶⁾ 폐암,^{24,26,27)} 간암,³³⁾ 호흡기계통 암³³⁾ 등과 같이 다양한 암의 발병과 그로 인한 사망 위험이 높게 나타났다.

실험실 업무와 발암성과의 관계 연구에서 여러 가지 요인들과의 상관성들이 밝혀져 왔다. 우선, 화학물질에 많이 노출될수록 특정 부위의 암으로 인한 사망률이나 발병률이 높아진다고 보고 있다.^{19,29,31,55)} Gustavsson 등²⁹⁾의 연구에 의하면, 벤젠 등의 유기용매를 많이 취급하는 실험실의 암 발병률비(standardized cancer incidence ratio, 이하 SIR)가 110(95% CI 88-138)으로 적게 취급하는 실험실의 80(95% CI 58-106)에 비해 높았고 특히, 유방암, 림프 및 조혈계통암 등에서

Table 1. Epidemiological studies investigating cancer mortalities or incidence rates among chemistry/biology laboratory workers

Author(s) (year)	Study design	Subjects	Period	Population	Death rates [MOR* (95% CI)]	Incidence rates [SIR** (95% CI)]	Specific cancers
Li <i>et al.</i> ⁽¹⁷⁾ (1969)	retrospective cohort study	American Chemical Society (ACS) members	1948-1967	3,637	1.2 (1.1-1.3)	-	· increased the risk of pancreatic cancer and lymphoma
Olin ⁽¹⁸⁾ (1976)	retrospective cohort study	chemical engineering graduates	1930-1950	530	1.7 (1.1-2.6)	-	· lymphatic/hematopoietic cancers
Olin and Ahlbom, ⁽¹⁹⁾ (1980)	retrospective cohort study	Royal Institute of Technology (RIT) graduates	1930-1977	822	1.3 (0.9-1.8)	-	· brain, lymphatic/hematopoietic cancers
Hoar and Peil ⁽²⁰⁾ (1981)	retrospective cohort study	Du Pont chemists	1964-1977	3,761	82***	71	· slightly higher risk for colon cancer
Walrath <i>et al.</i> ⁽²¹⁾ (1985)	retrospective cohort study	American Chemical Society (ACS) female members	1925-1979	347	1.15 (1.1-2.1)	-	· lymphatic/hematopoietic cancers · pancreatic, breast, stomach cancers
Checkoway <i>et al.</i> ⁽²²⁾ (1985)	retrospective cohort study	Oak Ridge National Laboratory (ORNL) workers	1943-1977	20,646	0.78*** (199 observed vs. 249.98 expected)	-	· prostate cancer and leukemia
Maher and Defons ⁽²³⁾ (1986)	retrospective cohort study	Rohm & Hass company researchers	1950-1978	1,510	66*** (41-101)	-	· lymphatic/hematopoietic cancers
Cordier ⁽²⁴⁾ (1990)	retrospective cohort study	biomedical research workers at the Pasteur Institute	1971-1986	3,765	66	-	· pancreatic and bone cancer
Vägerö <i>et al.</i> ⁽²⁵⁾ (1990)	retrospective cohort study (nested case-referent study)	cases from the cancer registries of England, Wales and Sweden	[England/Wales] 1971-1978 [Sweden] 1961-1979	[England/Wales] 3,991 [Sweden] 5,003	-	188*** (111-296)	· malignant melanoma
Carpenter <i>et al.</i> ⁽²⁶⁾ (1991)	population-based case-control study	laboratory workers (15-44 yrs)	1971-1980	2,265	stomach 1.21 (0.67-2.19) brain/nerve 1.72 (1.07-2.74) bone 3.53 (1.23-2.72)	-	· brain/nervous system and bone cancers · stomach cancer
Cordier <i>et al.</i> ⁽²⁷⁾ (1995)	retrospective cohort study	biomedical research workers at the Pasteur Institute	1971-1987	3,765	male 58*** (46-71) female 67*** (51-86)	-	· bone cancer for males · brain, pancreatic cancers for females

*MOR, Mortality Odds Ratio; **SIR, Standardized Incidence Ratio; ***SMR, Standardized Mortality Ratio; **** only for chemists.

Table 1. Continued

Author(s) (year)	Study design	Subjects	Period	Population	Death rates [MOR* (95% CI)]/[SIR** (95% CI)]	Incidence rates	Specific cancers
Brown <i>et al.</i> ⁽²⁸⁾ (1996)	retrospective cohort study	biological, biomedical or agronomic research institutes	1963-1994	12,703	male 68*** (55-83) female 77*** (59-98)	-	· slight increases in lymphatic/ hematopoietic cancers in employees ever worked in a laboratory
Gustavsson <i>et al.</i> ⁽²⁹⁾ (1999)	retrospective cohort study	laboratory employees at the Karolinska Institute and Karolinska Hospital in Stockholm	1952-1993 (mortality) 1958-1992 (incidence)	2,553	91*** (65-124)	92 (74-111)	· malignant melanoma · hematopoietic cancers
Wennborg <i>et al.</i> ⁽³⁰⁾ (1999)	retrospective cohort study	biomedical laboratory workers	1970-1989	7,958 (case:5,035)	male 0.82*** (0.54-1.18) female 0.53*** (0.30-0.88)	male 0.77 (0.58-1.00) female 0.81 (0.62-1.04)	· brain, colon tumor for male scientists · breast cancer, malignant melanoma for female scientists
Wennborg <i>et al.</i> ⁽³¹⁾ (2001)	retrospective cohort study	biomedical laboratory research personnel	1970-1994	5,288 (case:3,277)	-	male 0.71**** (0.48-1.02) female 0.85**** (0.60-1.17)	· malignant melanoma, breast cancer for female laboratory employees
Kauppinene <i>et al.</i> ⁽³²⁾ (2003)	retrospective cohort study	Finnish chemists	1979-1988	4,722	-	0.99 (0.85-1.14)	· slight excesses of SIRs non-Hodgkin's lymphoma and leukemia
Sharam <i>et al.</i> ⁽⁶⁾ (2003)	retrospective cohort study	Israel laboratory workers	1960-1997	4,300	-	1.04 (0.91-1.18)	· malignant melanoma of skin · breast, ovarian, thyroid, prostate cancers
van Bameveld <i>et al.</i> ⁽³³⁾ (2004)	retrospective cohort study	biomedical, biological, or agronomic research laboratory	1960-1992	9,711 (case:7,307)	0.77*** (0.66-0.89)	-	· respiratory organs and lung cancer
Kubale <i>et al.</i> ⁽³⁴⁾ (2008)	retrospective cohort study	chemical laboratory workers at U. S. Department of Energy facilities	1943-1998	6,157	0.66*** (0.59-0.72)	-	· lymphatic/hematopoietic cancers · elevation of multiple myeloma
Canu <i>et al.</i> ⁽³⁵⁾ (2008)	retrospective cohort study	biological research laboratories in the French Atomic Energy Commission (CEA) and National Institute of Health and Medical Research (INSERM)	[CEA] 1968-1994 [INSERM] 1980-1993	[CEA] 3,509 [INSERM] 4,966	[CEA]*** 0.66 (0.54-0.80) [INSERM]*** 0.55 (0.39-0.75)	-	· [CEA] slight excesses of colon, rectum, liver, pleura, melanoma, breast, uterus, ovary, multiple myeloma · [INSERM] slight excesses of leukemia, colon, pleura, pancreas, bladder

*MOR, Mortality Odds Ratio; **SIR, Standardized Incidence Ratio; ***SMR, Standardized Mortality Ratio; **** only for solvents.

더 높은 발병률을 보였다. Olin and Ahlbom¹⁹⁾은 화학자들과 일반 대중 및 건축가들을 비교한 연구에서 화학자들의 일반적인 암 사망률비(standardized cancer mortality ratio, 이하 SMR)가 다른 군들에 비해 높았고 이는 벤젠 등의 발암물질들에 복합적으로 노출될 위험이 높기 때문인 것으로 설명하였다. Wennborg 등³¹⁾의 연구에서는 전체 암 발병률비(SIR)는 낮으나 유기용제를 취급한 실험실 근무자의 경우 여성에게서는 유방암(SIR 1.13, 95% CI 0.66-1.81)과 악성 흑색종(SIR 2.73, 95% CI 1.10-5.63)이, 남성에게서는 악성 흑색종 이외의 피부암(SIR 1.85, 95% CI 0.38-5.41)과 비노생식기암(SIR 1.34, 95% CI 0.36-3.42)의 발병률이 높게 나타났다. 또한, 포름알데히드를 취급한 실험실 근무자의 경우에도 여성은 악성 흑색종(SIR 2.52, 95% CI 0.69-6.44)과 그 이외의 피부암(SIR 2.76, 95% CI 0.07-15.4)이, 남성은 폐암(SIR 1.27, 95% CI 0.26-3.71), 전립선암(SIR 1.37, 95% CI 0.45-3.20), 악성 흑색종 이외의 피부암(SIR 2.33, 95% CI 0.28-8.40)의 발병률이 높은 것으로 밝혀졌다. 또한, 최근 연구 결과에서 실험실에서 노출 가능한 이온화 방사선에 의해 암이 발병할 수 있다는 연관성이 밝혀지고 있다.^{34,35)} 실험실 근무자들이 발암물질에 노출된 이후 20년 이상의 잠복기를 거친 후 발병하는 경향을 보이고 있고⁶⁾ 실험실 근무기간이 길수록 암 발병률이 상승하는 경향을 보인다는 연구 결과^{22,23,34)}도 있다. 아울러 젊은 과학자일수록 실험실 업무에 따른 암 사망률이 높아진다는 보고도 있다.²⁶⁾

실험실 근무자의 직업적 노출과 암 발병률 혹은 암 사망률과의 관계에 대해서는 아직도 연구가 진행 중이다. 대부분의 연구가 후향적 코호트 연구(retrospective cohort study) 방법을 취하고 있는데 이로 인한 제한점들이 있다. 과거에 실험실에 근무한 사람들의 실제 화학물질 등에 대한 노출 정도를 알기가 어렵고^{19,34)} 따라서 노출에 따른 양·반응 관계의 추론이 쉽지 않다는 점이 가장 많이 제기되고 있는 문제이다. 과거의 노출 종류나 정도에 대한 지식이 부족하기 때문에 대부분 근무 형태를 재분류하여 상관성을 연구하는데 이 때 직무나 부서의 업무 내용을 연구자가 주관적으로 판단함으로써 분류의 오류(classification error)를 범할 수도 있다.³⁴⁾ 또한 암 사망률의 경우 암으로 인한 사망자수가 적기 때문에 유의성이 쉽게 드러나지 않는다는 점도 제한점 중 하나이다.^{23,31,34,35)} 이는 대부분 실험실 근무자들이 20대의 건강한 신체조건을 가진 사람들로 구성되는 경우가 많다는, 즉 건강한 근로자 효과(healthy worker effect)로 인할 수도 있다고 연구

자들은 설명하고 있다.^{9,27-29,32-34)}

2. 생식독성

Table 2는 실험실에서 유기용제와 같은 화학물질을 취급하는 여성 실험실 근무자들의 자연유산이나 태아 기형 등 생식독성과 관련한 연구 결과들을 정리한 것이다. 여성들의 실험실 활동 여부와 태아의 선천적 기형이나 평균 체중, 자연유산 등과 크게 상관성이 없다는 연구 결과들^{41,44)}도 일부 제시되기는 하나, 다양한 연구 결과들에서 대체로 연관성이 있는 것으로 확인되고 있다.

Meirik 등³⁶⁾은 여성 실험실 근무자의 태아가 기형일 확률이 일반 대중에 비해 유의하게 높다고 보고하였고, Holmberg³⁷⁾와 Hansson 등³⁸⁾의 연구에서는 태아의 중추신경계 이상과 자연유산의 확률이 증가한다는 연구 결과를 제시하였다. Axelsson 등³⁹⁾은 바이러스학 연구실 근무자들에게서 자연유산의 상대위험도(RR)가 유의하게 증가하는 것을 확인하고, 바이러스 에어로졸이 생식독성을 일으키는 것으로 보았다. 또 다른 연구⁴²⁾에서는 유기용제를 취급하는 실험실 근무자의 자연유산이 빈번하게 나타난다고 제시하였다. Heidam⁴⁴⁾은 전체적으로 여성 실험실 근무자들의 자연유산이 다른 직종의 여성들에 비해 유의한 증가를 보이고 있지는 않으나, 근무 장소간의 비교에서는 산업체의 실험실 근무 직종의 OR이 1.2(95% CI 0.6-2.5)로 약간의 연관성을 보인다고 보고한 바 있다. Ericson 등⁴³⁾은 1975년 스웨덴 인구 조사 결과를 토대로 분석한 결과 태아의 선천적 기형이나 그로 인한 조기 사망 비율이 실험실 근무자에게서 상당히 높은 것으로 파악하였으나 이를 유발할 수 있는 특정 유기용제와의 관계는 확실히 밝히지 못하였다. 직업적으로 유기용제에 노출되는 임신 여성들(실험실 근무자 포함)에 대한 캐나다의 Motherisk 연구⁴⁶⁾에서는 태아의 선천적 기형에 대한 상대위험도(RR)가 노출되지 않은 군에 비해 13배가 높았고 노출 기간이 길수록 태아의 평균 체중은 유의하게 적어지는 경향을 발견하였다(평균 2,975 g vs. 3,431 g). 덴마크의 전국 출생 코호트(1997-2003)를 분석한 결과, 실험실 근무자와 대조군 간에 유의한 차이가 발견되지는 않았으나 유기용제 등에 많이 노출되는 것으로 보이는 방사면역분석(radioimmunoassay)과 방사선동위원소식별 과정(radiolabelling)에 근무하는 실험실 근무자의 경우 조산과 태아 기형의 OR이 유의하게 높았다.⁴⁹⁾ 즉, 조산의 경우 방사면역분석의 OR은 2.2(0.8-6.2), 방사선동위원소식별 과정은 1.9(95% CI 0.8-4.6)이었고, 태아 기형의 경우 방사면역분석의 위험비(Hazard Ratio, 이하

Table 2. Epidemiological studies investigating reproductive adverse effects among chemistry/biology laboratory workers

Author(s) (year)	Study design	Subjects	Period	Population	Results ^{***}
Meirik <i>et al.</i> ⁽³⁶⁾ (1979)	registry-based cohort study	women in the university's laboratories	1972-1977	727	· women working in laboratories RR* 1.7 [†] · congenital malformations(29) were significantly larger than the expected numbers(17) (p<0.01)
Holmberg ⁽⁷⁾ (1979)	registry-based case-control study	women exposed more often to organic solvents during the 1st trimester of pregnancy	1976-1978	120 (case)	· women exposed to solvent OR** 6.5 [†] · organic solvent exposure was more common in cases ($\chi^2=8.07$, p<0.01)
Hansson <i>et al.</i> ⁽³⁸⁾ (1980)	registry-based case-control study	women employed in laboratories	1973-1979	735	· slight increased miscarriage rate RR 1.7 [†] · no. of abnormal births in chemical laboratory groups were larger than nonchemical group ($\chi^2=6.6$, p=0.01)
Axelsson <i>et al.</i> ⁽³⁹⁾ (1980)	case-control study	personnel working at a laboratory for diagnostic virology	1958-1978	213	· increase in spontaneous abortion RR 2.6 [†] · the difference in miscarriages and perinatal death rate could be seen between exposed and nonexposed woman (p=0.08)
Ericsson <i>et al.</i> ⁽⁴⁰⁾ (1982)	case-control study	female laboratory workers enrolled in National Registry of Congenital Malformations	1976-1978	201 (reference:402)	· women working in laboratories during pregnancy OR 3.2 [†] · laboratory work was reported to occur more often among case mothers than among controls
Axelsson <i>et al.</i> ⁽⁴¹⁾ (1984)	retrospective cohort study	laboratory workers at the University Gothenberg	1968-1979	745 (pregnancy case:1,160)	· slight increase in the miscarriage rate RR 1.31 (0.89-1.91) · no differences in perinatal death rates or the prevalence malformations between solvent-exposed and non-exposed group
Axelsson <i>et al.</i> ⁽⁴²⁾ (1984)	case-control study	women working in university laboratories	1968-1979	782	· more frequently reported for solvents and miscarriages
Ericsson <i>et al.</i> ⁽⁴³⁾ (1984)	cohort study & case-control study	infants and women coded as laboratory workers in the 1975 Swedish census	1975	1,161 infants (reference:98,354)	· higher numbers of infants who died neonatally or/and had congenital malformations
Heidam ⁽⁴⁴⁾ (1984)	prospective cohort study	hospital/industrial laboratory female workers in Danish county of Funen	1972-1980	845 (reference:1,431)	· no increased risk of spontaneous abortion in exposed women · slight increase of spontaneous abortion in industry laboratory workers

*RR, Relative Risk; **OR, Odds Ratio; *** (), 95% confidence interval; †calculated by Vecchio *et al.* (2003).

Table 2. Continued

Author(s) (year)	Study design	Subjects	Period	Population	Results ^{***}
Taskinen <i>et al.</i> ⁽⁴⁵⁾ (1994)	case-control study	women working in laboratories	1970 (case) 1975-1986 (reference)	676 (case:232)	<ul style="list-style-type: none"> · no association with congenital malformation · significant associations with spontaneous abortion for exposure to toluene OR 4.7 (1.4-15.9), xylene OR 3.1 (1.3-7.5), formalin OR 3.5 (1.1-11.2)
Khattak <i>et al.</i> ⁽⁴⁶⁾ (1999)	prospective cohort study	pregnant women exposed occupationally to organic solvents	1987-1996	125 (lab technician: 21)	<ul style="list-style-type: none"> · major malformation RR* 13.0 (1.8-99.5) · lower birth weight, neonatal complications (eczema)
Wennborg <i>et al.</i> ⁽⁴⁷⁾ (2000)	retrospective cohort study	female laboratory workers in Sweden	1990-1994	1,052	<ul style="list-style-type: none"> · no elevated OR** in spontaneous abortions for laboratory work · chloroform and lab work OR 2.3 (0.9-5.9) · gestational age infants and lab work OR 1.9 (0.7-5.2)
Wennborg, <i>et al.</i> ⁽⁴⁸⁾ (2002)	case-control study	female university employees	1970-1989	249 (reference:862)	<ul style="list-style-type: none"> · any kinds of solvents and preterm births OR 3.4 (1.0-11.9) · preterm births and lab work OR 1.3 (0.7-2.6) · post-term births and work with bacteria OR 2.7 (1.0-7.4)
Zhu <i>et al.</i> ⁽⁴⁹⁾ (2006)	prospective cohort study	female laboratory technicians in Denmark	1997-2003	1,025	<ul style="list-style-type: none"> · increased risk of preterm birth in laboratory technicians working with radioimmunoassay or radiolabelling (OR 2.2 [0.8-6.2] or 1.9 [0.8-4.6]) · increased risk of major malformations in laboratory technicians working with radioimmunoassay or radiolabelling (HR 2.1 [1.0-4.7] or 1.8 [0.9-3.7])
Halliday-Bell <i>et al.</i> ⁽⁵⁰⁾ (2010)	population-based retrospective cohort study	Finnish laboratory workers in Finnish Medical Birth Registry	1990-2006	5,425 (reference:21,438)	<ul style="list-style-type: none"> · increased risk of small-for-gestational age (SGA) OR 1.27 (1.08-1.45) · increased risk of low birth weight OR 1.27 (1.02-1.52) · higher prevalence of post-term deliveries OR 1.16 (1.00-1.31)

*RR, Relative Risk; **OR, Odds Ratio; *** (), 95% confidence interval.

HR)는 2.1(95% CI 1.0-4.7), 방사선동위원소식별 과정은 1.8(95% CI 0.9-3.7)이었다. Halliday-Bell 등⁵⁰⁾의 최근 연구에 따르면 여성 실험실 근무자의 경우 조산의 위험이 증가하고(OR 1.27, 95% CI 1.08-1.45), 저체중아의 출산이 증가하며(OR 1.27, 95% CI 1.02-1.52), 분만 지연의 위험이 증가한다(OR 1.16, 95% CI 1.00-1.31).

특정 유기용제와 생식독성과의 관계를 연구한 결과들도 있다. Taskinen 등⁴⁵⁾은 자연유산의 OR이 일주일에 3일 이상 톨루엔에 노출된 경우 4.7(95% CI 1.4-15.9), 크실렌에 노출된 경우는 3.1(95% CI 1.3-7.5), 포르말린에 노출된 경우는 3.5(95% CI 1.1-11.2)로 특정 유기용제와 연관성이 높은 것으로 보고하였다. 포르말린이나 크실렌에 노출되는 여성들 대부분은 병리학이나 조직학 연구실에 근무하고 있었다. Lindbohm⁵⁶⁾은 여러 역학 연구 결과들을 검토해 본 결과 직업적으로 유기용제에 노출되는 여성의 자연유산과 톨루엔이 가장 높은 연관성을 보인다고 밝혔다. Wennborg 등^{47,48)}에 따르면, 일반적으로 실험실 근무자와 자연유산과의 관계는 불명확하나 클로로포름에 노출된 실험실 근무자의 경우 자연유산 OR이 2.3(95% CI 0.9-5.9)으로 유의하게 증가하였고, 박테리아와 방사선 동위원소도 자연유산과 조산에 영향을 미치는 것으로 제시하였다. 아울러, 연구실험실에서 유기용제에 노출이 많이 될수록 조산의 OR이 3배 정도 높아진다고 하였다. Zhu 등⁴⁹⁾도 노출 매트릭스를 활용하여 분석한 결과, 여성 실험실 근무자들이 유기용제에 노출이 많이 될수록 태아 기형의 위험이 높아진다고 보고하였다.

발암성과의 관계와 마찬가지로 실험실 근무자와 생식독성과의 관계도 여전히 연구가 진행 중이다. 생식독성과의 관계는 설문조사로 파악하는 경우가 많은데 이럴 경우 응답률이 저조하거나 응답자를 선택하는 데 있어서 오류가 발생하는 등⁴¹⁾의 문제가 발생할 수 있고 유기용제 노출이나 유산 등의 기억이 잘못 될 수도 있다.⁴⁸⁾ 특히, 유기용제 등의 노출은 당시의 상황을 정확히 알 수가 없어서 어느 정도 보호가 되었는지 파악하기가 어렵고⁴⁹⁾ 따라서 그 노출의 정도나 특성에 대한 기억도 부정확할 수 있다.^{44,46)} 또한 일반적이지 않은 실험실 노출에 관련하여 생식독성과 관련한 결과 수가 크지 않기 때문에 상관성을 입증하는 것이 쉽지 않고^{43,48)} 당시의 기타 간접 인자들 즉 흡연이나 음주에 대한 기억이 부정확한 경우가 많아 그 영향을 분석하는 것이 어렵다⁴¹⁾는 것이 연구의 제한점으로 제시되었다.

V. 우리나라 연구실험실의 노출 평가와 건강 영향 연구 동향

우리나라에서는 화학 혹은 생물 실험실 등에 근무하거나 근무하고 있는 실험실 근무자들의 건강 영향에 대한 역학 연구가 수행된 사례가 없다. 다만 병원 실험실이나 실습실의 감염성질환 사례⁵⁷⁾나 포름알데히드 노출 사례⁵⁸⁾ 등의 사례, 석·박사 과정 실험실 근무자들을 대상으로 현재 증상에 관한 설문조사 결과 등^{59,61,62)}이 일부 보고되었다. 2006년 연구실안전법 도입을 전후로 하여 실험실 근무자들의 유기용제 노출 평가 연구^{59,64)}가 제한적으로 수행되었다.

Table 3에 현재까지 국내에서 수행된 연구실험실 대상 노출 평가 연구를 정리하였다. 노출 평가는 대부분 화학물질에 대해서 이루어졌고 접근 방법은 직독식 기기를 사용하거나 펌프와 활성탄관을 활용한 지역 시료 채취 또는 실험실 근무자의 작업 시간 동안 개인 시료 채취가 대부분이었다. 측정 결과 작업환경의 노출 허용 기준을 초과하는 경우는 거의 없었다.^{60,62)} 연구실험실의 특성을 고려하여 단위 작업별로 단시간 개인 시료 채취를 한 연구⁶⁴⁾에서는 지역 시료가 실제 실험실 근무자의 노출을 과소평가할 우려가 있으므로 단위 작업별 개인 노출을 함께 적용하는 것이 필요함을 제안하였다. 최근 이슈가 되고 있는 나노 물질을 취급하는 실험실을 측정한 연구⁶³⁾에서는 직독식 기기를 활용하여 평가한 결과, 일부 공정의 실험실 근무자들이 나노 물질에 노출되고 있음을 발견하였고 따라서 노출 저감 조치를 할 것을 권고하였다. 그러나 아직까지 연구실험실에 대한 적절한 노출 평가 전략은 수립되어 있지 않은 상태이고 노출 평가 자체가 수행된 경우가 드물기 때문에 향후 좀 더 많은 연구를 통한 전략 모색이 필요하다.

VI. 결 론

본 고찰에서는 연구실험실의 화학물질 노출 평가의 다양한 접근 방법을 현재까지 알려진 수준에서 살펴본다. 또한 화학물질 노출과 연관성이 있어 보이는 실험실 근무자의 건강 영향, 특히 발암성과 생식독성 영향에 대한 역학 연구 결과를 체계적으로 정리하였다.

실험실 근무자에 대한 노출 평가 방법은 크게 정량적 방법과 정성적 방법으로 나눌 수 있다. 정량적인 노출 평가는 공기 중 지역시료를 통해 연구실험실의 노출 현황에 대한 대표값을 찾거나 실험실 근무자의 하루 후

Table 3. Exposure assessment studies for research laboratories in Korea (1996-2010)

Author(s) (year)	Subjects	Measured hazards	Exposure assessment strategy	Results
Lee ⁽⁵⁹⁾ (1996)	· chemical laboratory workers in universities	-	· questionnaire survey	· 86% of the researchers handling chemicals complained the self-symptoms such as headaches, skin rashes and dizziness.
Kim ⁽⁶⁰⁾ (1997)	· chemical laboratory workers in universities	· VOCs	· VOCs: pump+activated charcoal tube (area sampling) · lab workers: questionnaire survey	· The concentrations of some chemicals were above the limits.
Yoo <i>et al.</i> ⁽⁶¹⁾ (2000)	· occupational health laboratories in Seoul and Gyunggi district (22)	· VOCs	· VOCs: pump+activated charcoal tube (area/ personal sampling) · fume hood: real time monitoring	· 17% of the fume hoods were not properly functioned. · The concentrations of VOCs were below the limits.
Ha <i>et al.</i> ⁽⁶²⁾ (2010a)	· 4 labs in governmental agencies · 5 labs in universities · 30 laboratory workers	· asbestos, VOCs, PM ₁₀ , CO ₂	· lab workers: questionnaire survey · CO ₂ , PM ₁₀ : real time monitoring (area sampling) · VOCs: pump+activated charcoal tube/real time monitoring (area sampling) · asbestos: pump+filter · fume hood: real time monitoring	· All samples were below the limits. · The half of the fume hoods were not properly functioned. · Some self-symptoms such as headache and nose irritation were reported by the lab workers.
Ha <i>et al.</i> ⁽⁶³⁾ (2010b)	· hybrid nanomaterial laboratory	· nanomaterials	· real time monitoring (surface area/particle counts/ mass concentrations)	· Laboratory researchers performing acid treatment experiments on surfaces of carbon nanotubes (CNTs) were exposed to airborne nano particles.
Byun <i>et al.</i> ⁽⁶⁴⁾ (submitted)	· 6 chemistry laboratories (university and research institutes)	· VOCs	· area sampling: pump+activated charcoal tube/real time monitoring · personal sampling : pump+activated charcoal (8 hr time weighted average/task-based)	· All samples were below the limits. · There was correlation between area and personal sampling results. · Area samples tended to underestimate the personal exposure samples.

은 단위 작업별 노출 정도를 파악하는 방법이다. 최근에는 비슷한 연구업무를 하는 실험실 노출 평가에 유사노출그룹 전략을 적용하는 연구가 있었다. 한편, 연구실험실의 업무 특성상 정량적 노출 평가의 어려움이 있다고 보고 컨트롤밴딩의 전략을 활용하여 정성적인 노출 평가를 시도하는 연구들이 수행되고 있다.

실험실 근무자의 건강 영향으로는 발암성과 생식독성이 주로 연구되었다. 발암성의 경우 림프 및 조혈계통암과 악성 흑색종 등과의 연관성은 수차례 입증된 바 있고, 기타 유방암, 자궁암 및 전립선암 등의 생식계암과 위장관암, 뇌암 및 뼈암 등과의 연관성들은 명확하지는 않으나 발병 사례가 증가하는 경향을 보인다. 실험실 근무와 자연유산 및 태아 기형 등의 생식독성과의 상관관계는 대체로 있는 것으로 보이고, 특히 자연유산의 확률은 실험실에 근무하면서 화학물질에 노출될 경우 유의하게 높아지는 것으로 여겨진다. 태아의 체중이나 기형, 조기 사망 등과의 연관성은 높은 경향을 보이기는 하나, 명확한 연관성을 보이고 있지는 않다. 이러한 실험실 근무자의 발암성과 생식독성과 같은 건강영향에 대한 연구들은 후향적으로 이루어졌기 때문에 과거에 화학물질에 노출된 정도나 그 특성을 파악하기 어렵고 주로 대상자들의 기억에 의존한다는 점에서 제한적이기는 하나 지속적인 연구 결과 상당히 많은 증거들이 축적되고 있다.

우리나라는 현재까지 실험실 근무자에 대한 노출 평가가 제한적으로 연구되었으나 건강 영향에 대한 역학 조사가 실시된 적은 없다. 외국에서 선행된 역학 연구 결과를 볼 때 실험실의 화학물질 노출과 건강 피해의 연관성을 부인하기 어려운 것으로 보인다. 따라서 우리나라 실험실 근무자를 대상으로 하는 역학 연구가 수행되어야 한다.

VII. 향후 연구 및 정책방향

‘연구실 안전환경 조성에 관한 법률’(2005년 제정, 2006년 시행)은 연구실험종사자들의 안전과 건강을 보호하기 위해 마련된, 세계에 유례가 없는 법이다. 효과적인 법 이행을 위하여 교육과학기술부는 ‘연구실 안전환경 조성 및 기반구축 종합계획(08-'12)’을 발표하기도 하였다. 이 계획은 연구실안전법의 한계 때문에 불가피하게 제한된 부분이 있을 수 있으나, 실험실 근무자의 건강을 보호하기 위한 정책이 되기 위해서는 연구되어야 할 문제들이 아직도 많다. 무엇보다 연구실험실의 유해 인자 노출에 따른 위험을 최소화하기 위한 전략을 모색하고, 실험실 근무자들의 직업성 질환을 조

사·감시할 수 있는 체계를 마련하는 것이 필수적이다. 즉, 연구실험실의 유해환경과 실험실 근무자 노출 평가, 실험실 근무자의 건강 영향 초기 지표의 개발과 활용, 건강 검진 체계와의 연계 및 개선, 실험실 근무자를 대상으로 한 역학연구, 실험실 근무자의 건강증진 프로그램 개발, 연구실험실의 안전보건 관리 기법 개발, 연구실 환경의 위험성에 관한 의견소통(risk communication) 체계 마련 등이 필요하다.

열거한 항목 중 실험실 근무자의 노출 평가를 위하여 기술적으로 우선 해결되어야 할 과제를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- 연구 분야별로 가능한 유해 요인을 설문 조사와 문헌 조사, 현장 방문 등을 통하여 밝혀야 한다. 특히 기존에 알려진 유해 인자 이외에 새롭게 제기되는 나노 물질이나 제품화 이전에 연구 단계에서 사용되는 유해성이 아직 덜 확인된 인자에 대한 파악이 중요하게 다루어져야 할 것이다.
- 연구실험실의 노출에 영향을 주는 주요 인자들을 결정함으로써 효과적인 노출 관리 방법을 도출한다.
- 연구실험실 작업의 특성을 반영하는 노출 평가 방법이 모색되어야 한다. 특히 단시간 고농도 다품종 노출의 특성을 파악할 수 있는 실시간 노출 측정 장비의 개발과 활용이 모색되어야 한다.
- 실험실 근무자의 연구 활동에 따라 노출이 어떻게 달라지는지와 노출 기여 요인을 고려한 노출 추정 모형이 개발되어야 한다.
- 컨트롤밴딩(control banding)과 같은 정성 평가 기법을 도입하여 연구실험실의 노출 위험을 스크리닝하기 위한 도구로서 활용될 수 있도록 모색하여야 한다.

우리나라는 연구실험 중 안전사고로 해마다 사상 사건이 끊이지 않을 정도로 열악한 환경임에도 연구를 하기 위해서는 불가피한 사고인 것처럼 간과하여 왔다. 다행히도 최근에 안전 불감증에 대한 전반적인 문제 인식과 함께 연구실험실의 안전 및 보건에 관한 관심도 커지고 있다. 우리나라 연구 인력 규모가 세계적인 수준이고 미래 산업의 중요한 분야로서 과학기술 개발의 중요성이 부각되고 있는 요즘, 실험실 근무자들이 연구에 매진할 수 있는 건강하고 안전한 연구 환경을 확보하고 지속적으로 관리하는 것은 그들의 기본권을 보장하는 매우 중요한 일이다. 환경보건 전문가의 기본적인 연구 체계인 문제 인식, 노출 평가, 독성 평가를 통한 위해성 평가와 관리(risk assessment and management), 그리고 위해성 소통의 전문성이 실험실 근무자 건강 보호에도 중요한 기여를 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 2010-0010931).

참고문헌

1. Ministry of Education, Science and Technology, Korea. 2008 Research and Development Activities Survey, 2008.
2. Ministry of Education, Science and Technology, Korea. Pilot Study for Building a Laboratory Safety and Health Center, 2009.
3. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 29 CFR 1910.1450 'Occupational Exposure to Hazardous Chemicals in Laboratories', 1990.
4. Ministry of Education, Science and Technology, Korea. Laboratory Safety Act, 2009.
5. Ministry of Education, Science and Technology, Korea. 2006 Surveillance on Laboratory Safety and Health Status of Universities and R&D Institutes, 2006.
6. Sharam, J., Gurvich, R. and Kneshet, Y. : Cancer incidence among laboratory workers in biomedical research and routine laboratories in Israel: Part I - The cohort study. *American Journal of Industrial Medicine*, **44**, 600-610, 2003.
7. Rachet, B., Partanen, T., Kauppinen, T. and Sasco, A. J. : Cancer risk in laboratory workers: An emphasis on biological research. *American Journal of Industrial Medicine*, **38**, 651-665, 2000.
8. Vecchio, D., Sasco, A. J. and Cann, C. I. : Occupational risk in health care and research. *American Journal of Industrial Medicine*, **43**, 369-397, 2003.
9. Apostoli, P., Lucchini, R. and Alessio, L. : Proposal of a method for identifying exposure to hazardous chemicals in biomedical laboratories. *Clinica Chimica Acta*, **256**, 75-86, 1996.
10. Julien, R., DiBerardinis, L., Herrick, R. and Edwards, R. : Strategy to assess exposures of laboratory personnel to select OSHA-regulated chemicals at Massachusetts Institute of Technology. *Chemical Health & Safety*, July/August, 25-29, 2001.
11. Miller, S. K., Bigelow, P. L., Sharp-Geiger, R. and Bucham, R. M. : Exposures of geotechnical laboratory workers to respirable crystalline silica. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, **14**, 39-44, 1999.
12. Kretchman, K. : Exposure assessment in a laboratory environment. *Chemical Health & Safety*, January/February, 2002.
13. Henn, S. A., Utterback, D. F., Waters, K. M., Markey, A. M. and Tankersley, W. G. : Task- and time-dependent weighting factors in a retrospective exposure assessment of chemical laboratory workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **4**, 71-79, 2007.
14. Zalk, D. M. and Nelson, D. I. : History and evolution of control banding: A review. *Journal of Occupational and Environmental Health*, **5**, 330-346, 2008.
15. Hashimoto, H., Goto, T., Nackachi, N., Suzuki, H., Takebayashi, T., Kajiki, S. and Mori, K. : Evaluation of the control banding method - Comparison with measurement-based comprehensive risk assessment. *Journal of Occupational Health*, **49**, 482-492, 2007.
16. Paik, S. Y., Zalk, D. M. and Swuste, P. : Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures. *Annals of Occupational Hygiene*, **52**, 419-428, 2008.
17. Li, F. P., Fraumeni J. F. Jr., Mantel, N. and Miller, R. W. : Cancer mortality among chemists. *Journal of National Cancer Institute*, **43**, 1159-1164, 1969.
18. Olin, G. R. : Leukemia and Hodgkin's disease among Swedish chemistry graduates. *Lancet*, **2**, 916, 1976.
19. Olin, G. R. and Ahlbom, A. : The cancer mortality among Swedish chemists graduated during three decades. *Environmental Research*, **22**, 154-161, 1980.
20. Hoar, S. K. and Pell, S. : A retrospective cohort study of morality and cancer incidence among chemists. *Journal of Occupational Medicine*, **23**(7), 485-494, 1981.
21. Walrath, J., Li, F. P., Hoar, S. K., Mead, M. W. and Fraumeni, J. Jr. : Causes of death among female chemists. *American Journal of Public Health*, **75**(8), 883-884, 1985.
22. Checkoway, H., Mathew, R. M., Shy, C. M., Watson, J. E. Jr., Tankersley, W. G., Wolf, S. H., Smith, J. C. and Fry, S. A. : Radiation, work experience, cause specific mortality among workers at an energy research laboratory. *British Journal of Industrial Medicine*, **42**, 525-533, 1985.
23. Maher, K. V. and Defonso, L. R. : A historical cohort study of mortality among chemical researchers. *Archives of Environmental Health*, **41**(2), 109-116, 1986.
24. Cordier, S. : Risk of cancer among laboratory workers. *Lancet*, **335**, 1097, 1990.
25. Vågerö, D., Swerdlow, A. J. and Beral, V. : Occupation and malignant melanoma: a study based on cancer registration data in England and Wales and in Sweden. *British Journal of Industrial Medicine*, **47**, 317-324, 1990.
26. Carpenter, L., Beral, V., Roman, E., Swerdlow, A. J. and Davis, G. : Cancer in laboratory workers. *Lancet*, **338**, 1080-1081, 1991.
27. Cordier, S., Mousel, M.-L., Le Goaster, C., Gachelin, G., Le Moual, N., Mandereau, L., Carrat, F., Michaud, G. and Hemon, D. : Cancer risk among workers in biomedical research. *Scandinavian Journal of Work, Environment, and Health*, **21**, 450-459, 1995.
28. Brown, T. P., Paulson, J., Pannett, B., Coupland, C.,

- Coggon, D., Chilvers, C. E. D. and Sasco, A. J. : Mortality pattern among biological research laboratory workers. *British Journal of Industrial Medicine*, **73**, 1152-1155, 1996.
29. Gustavsson, P., Reuterwall, C., Sadigh, J. and Söderholm, M. : Mortality and cancer incidence among laboratory technicians in medical research and routine laboratories (Sweden). *Cancer Causes and Control*, **10**, 59-64, 1999.
30. Wennborg, H., Yuen, J., Axelsson, G., Ahlbom, A., Gustavsson, P. and Sasco, A. J. : Mortality and cancer incidence in biomedical laboratory personnel in Sweden. *American Journal of Industrial Medicine*, **35**, 382-389, 1999.
31. Wennborg, H., Yuen, J., Nise, G., Sasco, A. J., Vainio, H. and Gustavsson, P. : Cancer incidence and work place exposure among Swedish biomedical research personnel. *International Archives of Occupational Environmental Health*, **74**, 558-564, 2001.
32. Kauppinen, T., Pukkala, E., Saalo, A. and Sasco, A. J. : Exposure to chemical carcinogens and risk of cancer among Finnish laboratory workers. *American Journal of Industrial Medicine*, **44**, 343-350, 2003.
33. van Barneveld, T. A., Sasco, A. J. and van Leeuwen, F. E. : A cohort study of cancer mortality among Biology Research Laboratory workers in the Netherlands. *Cancer Causes and Control*, **15**, 55-66, 2004.
34. Kubale, T., Hiratzka, S., Henn, S., Markey, A., Daniels, R., Utterback, D., Waters, K., Silver, S., Robinson, C., Macievic, G. and Lodwick, J. : A cohort mortality study of chemical laboratory workers at department of energy nuclear plants. *American Journal of Industrial Medicine*, **51**, 656-667, 2008.
35. Canu, G. I., Rogel, A., Samson, E., Benhamou, S., Laplanche, A. and Tirmarche, M. : Cancer mortality risk among biologist research workers in France: first results of two retrospective cohort studies. *International Archives of Occupational Environmental Health*, **81**, 777-785, 2008.
36. Meirik, O., Källén, B., Gauffin, U. and Ericson, A. : Major malformations in infants born of women who worked in laboratories while pregnant. *Lancet*, **14**, 91, 1979.
37. Holmberg, P. C. : Central-nervous-system defects in children born to mothers exposed to organic solvents during pregnancy. *Lancet*, **28**, 177-179, 1979.
38. Hansson, E., Jansa, S., Wande, H., Källén, B. and Östlund, E. : Pregnancy outcome for women working in laboratories in some of the pharmaceutical industries in Sweden. *Scandinavian Journal of Work, Environment, and Health*, **6**, 131-134, 1980.
39. Axelsson, G., Jeansson, S., Rylander, R. and Unander, M. : Pregnancy abnormalities among personnel at a virological laboratory. *American Journal of Industrial Medicine*, **1**, 129-137, 1980.
40. Ericson, A., Källén, B., Meirik, O. and Westerholm, P. : Gastrointestinal atresia and maternal occupation during pregnancy. *Journal of Occupational Medicine*, **24**, 515-518, 1982.
41. Axelsson, G. and Rylander, R. : Use of questionnaires in occupational studies of pregnancy outcome. *Annals Academy of Medicine Singapore*, **13**, 327-330, 1984.
42. Axelsson, G., Lütz, C. and Rylander, R. : Exposure to solvents and outcome of pregnancy in university laboratory employees. *British Journal of Industrial Medicine*, **41**, 305-312, 1984.
43. Ericson, A., Eriksson M., Källén, B., Westerholm, P. and Zetterström, R. : Delivery outcome of women working in laboratories during pregnancy. *Archives of Environmental Health*, **39**, 5-10, 1984.
44. Heidam, L. Z. : Spontaneous abortions among laboratory workers; a follow up study. *Journal of Epidemiology and Community Health*, **38**, 36-41, 1984.
45. Taskinen, H., Kyrrönen, P., Hemminki, K., Hoikkala, M., Lajunen, K. and Lindbohm, M. L. : Laboratory work and pregnancy outcome. *Journal of Occupational Medicine*, **36**, 311-319, 1994.
46. Khattak, S., K-Moghtader, G., McMartin, K., Barrera, M., Kennedy, D. and Koren, G. : Pregnancy outcome following gestational exposure to organic solvents - A prospective controlled study. *Journal of the American Medical Association*, **281**, 1106-1109, 1999.
47. Wennborg, H., Bodin, L., Vainio, H. and Axelsson, G. : Pregnancy outcome of personnel in Swedish biomedical research laboratories. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **42**, 438-446, 2000.
48. Wennborg, H., Bonde, J. P., Stenbeck, M. and Olsen, J. : Adverse reproduction outcomes among employees working in biomedical research laboratories. *Scandinavian Journal of Work, Environment, and Health*, **28**, 5-11, 2002.
49. Zhu, J. L., Knudsen, L. E., Andersen, A.-M. N., Hjøllund, N. H. and Olsen, J. : Laboratory work and pregnancy outcomes: a study within the National Birth Cohort in Denmark. *Occupational Environmental Medicine*, **63**, 53-58, 2006.
50. Halliday-Bell, J. A., Quansah, R., Gissler, M. and Jaakkola, J. J. K. : Laboratory work and adverse pregnancy outcomes. *Occupational Medicine*, **60**, 310-313, 2010.
52. Wright, W. E., Peters, J. M. and Mack, T. M. : Organic chemicals and malignant melanoma. *American Journal of Industrial Medicine*, **4**, 577-581, 1983.
53. Chiazzie, L. Jr., Walf, P. and Ference, L. D. : A historical cohort study of mortality among salaried research and development workers of the Allied Corporation. *Journal of Occupational Medicine*, **28**, 1185-1188, 1986.
54. Divine, B. J. and Barron, V. : Texaco Mortality Study II : Patterns of mortality among white male by specific job groups. *American Journal of Industrial*

- Medicine*, **10**, 371-381, 1986.
55. Olin, G. R. : The hazards of a chemical laboratory environment-a study of the mortality in two cohorts of Swedish chemists. *American Industrial Hygiene Association*, **39**, 557-562, 1978.
 56. Lindbohm, M.-L. : Effects of parental exposure to solvents on pregnancy outcome. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **37**, 909-915, 1995.
 57. Kim, J. S. and Lee, H. W. : Studies on Microbiological Laboratory biosafety in Korea - I. A survey on biosafety status in laboratory. *Infection and Chemotherapy*, **20**(2), 133-146, 1988.
 58. Park, S. Y., Kim, C. Y., Kim, J. Y. and Sakong, J. : The health effects of formaldehyde during an anatomy dissection course. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **18**(3), 171-178, 2006.
 59. Lee, H. J. : A survey on safety and health at chemical laboratories in university. Master's thesis in Public Health in Seoul National University, 1996.
 60. Kim, M. S. : A study on organic solvent exposure in chemical laboratories of universities. Master's thesis in Public Health in Seoul National University, 1997.
 61. Yoo, K. M., Roh, Y. M., Han, J. G. and Won, J. I. : A survey and recommendation on safety and health for occupational health laboratories. *Korean Industrial Hygiene Association Journal*, **10**(2), 150-164, 2000.
 62. Ha, J. H., Shin, Y. C., Lee, H. S., Paik, S. Y., Yi, G. Y. and Lee, B. K. : Evaluation of air contaminants concentrations and ventilation systems in governmental agency and university laboratories. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, **20**(1), 63-69, 2010a.
 63. Ha, J. H., Shin, Y. C., Lee, S. C., Paik, S. Y., Kim, B. W., Choi, B. S., Kang, D. M. and Paik, N. W. : Exposure of laboratory workers to airborne nanoparticles during acid treatments on engineered carbon nanotubes. *Journal of Environmental Health Sciences*, **36**(5), 343-350, 2010b.
 64. Byun, H. J., Ryu, K. N., Yoon, C. S. and Park, J. : Quantitative assessment strategy for determining the exposures to the volatile organic chemicals in chemistry laboratories. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. (submitted)