실험실 사고예방을 위한 공학적 제어방법

이근원

산업안전보건연구원

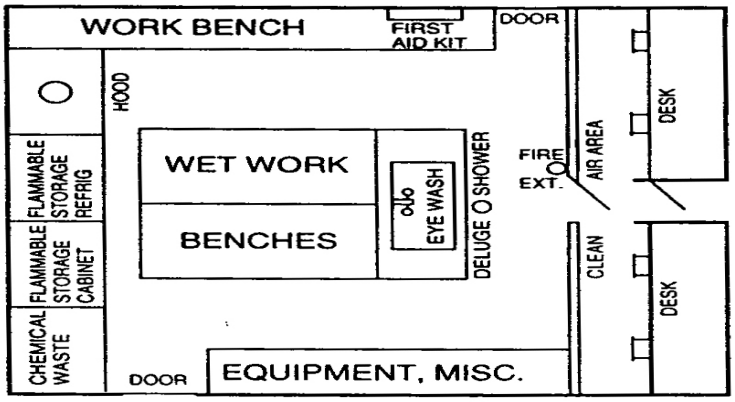
1. 실험실 설계에 의한 보호

실험실에서 작업자를 보호하기 위해 실험실을 공학적으로 제어해야 하는데 실험실의 공학적 제어는 작업장의 배치나 보호설비를 갖추는 것이다. 공학적 제어는 작업자를 보호하기 위해 실험실을 설계해야 한다. 또한 보호의 용도로 사용되는 방어막이나 후드 같은 특정한 유형의 설비들이 있다.

(1) 실험실 배치

작업자가 실내에서 작업하는 실험실은 실제로 작업자가 알고 있는 공학적 제어는 실험실의 안전을 고려해서 만들어야 하며 설계되어야 한다(그림 1참조). 실험실 설계의 핵심은 안전이다. 화학물질을 받아들이고 저장하고, 폐기물을 저장하고, 작업자의 작업을 위한 분리된 구역이다. 소규모 실험실은 하나의 혹은 두 개의 실(공간) 내에서, 규모가 큰 실험실들은 위의 각 작업들을 위한 별개의 공간을 가지고 있을 수도 있다. 격리는 한번에 여러 위험에 노출되는 것을 막고, 상반되는 물질의 분리에 도움이 된다. 또한 작업자의 작업장에 불필요한 물질의 혼합을 줄일 수 있다. 사무 혹은 자료입력, 기록 등으로부터 작업대를 분리하는 것은 화학물질의 누출을 최소화한다. 통로의 공간은 작업자가 어떠한 것으로 막지 않는다면 작업자가 자유롭게 움직이기에 충분히 넓어야 한다. 작업자가 걸림이 없이 쉽게 지나갈 수 있다면 걸상이나 의자를 사용하는 것을 허용할 수 있다.

큰 공간은 화재나 유출에 의해 하나가 막힌 경우에 대비하여 두 개의 비상구를 갖는다. 비상통로는 가능한 한 외부로까지 짧고 직선이어야 한다. 비상설비로의 접근은 빠르고 쉽게 하는 것이 중요하다 그러나 그것만으로는 충분하지 않다. 작업자는 그것들을 재빨리 찾을 수 있게 관찰하는 일이 항상 필요로 한다. 비상구는 충분한 조명신호를 가지고 있고 정전의 경우에 대비하여 비상등이 있다. 모든 비상 설비는 표지와 함께 분명히 보이는 곳에 설치한다. 작업자는 또한 사람들이 돌아다니는 것을 볼 수 있어야 한다.



[그림 1] 전형적인 실험실 배치(예)

① 유틸리티

실험실 내의 설비들은 물, 전기, 가스를 포함한다. 절대 전기콘센트에 과부하가 걸리지 않게 하고 가스배관, 수도배관 또는 전선은 변형하지 않는다. 유지·보수 자격자가 이것을 처리한다. 이것들은 만약 누군가 화학물질이나 다른 물질을 이동하고 있다면 특히 위험이 될 수 있다. 또한, 긴급 상황시 재빨리 닫을 수 있게 설비의 차단밸브나 스위치의 위치를 알아두는 것이 중요하다.

② 환기시스템

환기시스템은 외부에서 공기를 가져오고 내부의 공기와 혼합하는 것이다. 혼합공기의 일부분은 외부에서 소모된다. 이 공정은 작업자가 조작하는 화학물질로부터의 먼지, 증기, 가스의 농도를 감소시킨다. 또한 박테리아, 바이러스, 불쾌한 악취제거와 같은 공기중의 위험한 것들을 감소시킨다. 다.

③ 경보시스템

모든 실험실은 pull station과 함께 경보시스템을 가져야 한다. 많은 새로운 시스템은 경보기의 트리거(trigger)가 자동으로 연기, 열을 탐지한다. 또한 어떤 것은 화재억제 시스템을 갖는 것도 있다. 일반적 시스템은 물을 사용하는 스프링클러를 갖는다. 또한, 분말약제(dry chemicals), 폼(foam), 이산화탄소(carbon dioxide) 등의 다른 형태도 유용하며 각각은 장점과 단점을 갖는다. 그러나, 사람들의 눈, 코, 호흡기 등에 자극을 줄 수 있다. 이산화탄소 또한 불활성이고 일반적으로 화재 발생시 진화하는데 사용된다. 그러나 이것은 질식의 원인이 될 수 있다. 고용주는 실험실에 있는 시스템들에 대해 근로자에게 알려주어야 하고 안전한 대피를 위한 특별한 교육을 해야한다.

④ 특별한 설계

다음과 같은 위험들을 포함한 작업장을 위해 특별한 설계가 요구되며, 이에 해당되는 시설은 다음과 같으며, 실험실 설계시 특별히 요구되는 사항을 <표 1>에 나타내었다.

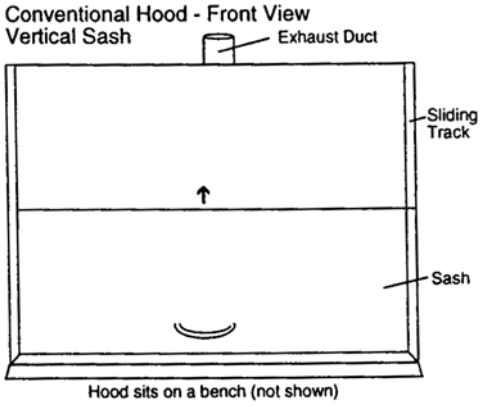
o 실험동물의 급식, 취급, 보호를 위해 분리된 설비
o 동물배설물, 위험한 혈액, 세포, 조직배양의 처리
o 독극물 실험실, 방사선 실험실, 높은 전염성의 질병이 있는 실험실에서의 누출을 막기 위한 다양한 단계의 봉쇄 방책
o 폭발물이 취급되는 실험실을 위한 파열판과 특수한 배출
o 극도로 위험한 조건을 가진 실험실을 다른 설비로부터의 고립

<표 1> 특별한 설계가 요구되는 실험실의 확인사항

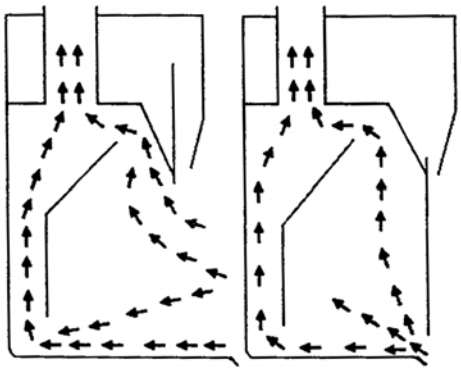
o 작업자의 실험실에 특별한 특징이 있나요? 위층, 지하층, 1층이나 특정 설비에서 근무합니까?
o 일상적인 경우와 비상시의 밝은 조명이 있습니까?
o 작업자의 작업장 근처에 가스, 화학물질, 장비, 문제가 생길 수 있는 공정 같은 특정한 위험들이 있습니까?
o 후드나 다른 안전장비들은 어디에 위치해 있습니까? 위험한 화학물질이나 다른 물질은 어디에 저장하고 있습니까?
o 대피로나 비상구가 작업자의 근처 어디에 있습니까? 다른 경로도 있습니까? 통로는 깨끗합니까?
o 비상시 전기, 수도, 가스나 다른 시설들은 재빨리 끌 수 있습니까?
o 작업자의 실험실에 비치한 경보시스템의 형태는 무엇입니까?
o 도움을 요청하기 위해 작업자는 특별한 경보시스템, 비공식 감시작용, 전화를 가지고 있습니까?
o 비상경보 풀스테이션(pull station)은 어디에 있는지 아십니까? 적절한 비상 전화번호를 알고 있습니까? 혹은 빨리 그것들을 찾을 수 있습니까?
o 다음의 비상설비가 어디에 있는지 아십니까? 소화기, 화학물질 누출시 사용하는 도구, 비상샤워, 응급조치도구, 눈세척실
o 비상설비에 접근하기 쉽습니까? 제거되어야 할 다른 장애물이 있습니까?
o 특정한 위험물질을 사용해 작업하거나 누출물 처리를 위한 특별한 보호의가 있습니까?
o 작업자의 실험실에 있는 다른 비상장비의 형태는 무엇입니까?

2. 실험실의 후드 등 환기시스템

실험 작업자의 안전과 건강 보호를 위한 공학적 제어의 수단으로 사용되는 일반적인 시스템이 후드이다. 후드는 기술적 사항에 따라 후드는 여러 가지 명칭을 갖는다. 즉, 흄후드(fume hood), 화학후드(chemical hood), 화학 흄후드(chemical fume hood), 배출후드(exhaust hood), 실험실후드(laboratory hood)등이 있다. 실험실 내에 공기오염물질의 배출을 방지하면서 화학물질 조작을 허용하기 위해 폐쇄된 덮개가 있는 실험실 형태의 후드(그림 1, 2 참조)를 사용하고 있다. 실제로 매우 다양한 종류의 후드가 전 작업구역의 큰 반응 용기나 장비로부터 증기를 빨아들이도록 설치되어 있으며 산업현장이나 실험실이 아닌 곳에도 설치되어 있다.



[그림 1] 일반적 후드



[그림 2] 화학후드의 공기 흐름

(1) 후드의 설계 및 작동방법

작업자는 실험실에 적합한 후드의 사용 방법을 알아야 한다. 후드는 다양한 크기가 있다. 그러나 표준너비는 4~6피트 정도이다. 사용 목적에 따라 여러 가지 형태와 후드의 특성을 가진다(표 1 참조). 형태에 관계없이 모든 후드는 건물로부터 실험실이나 작업자에게서 떨어져서 후드내의 공기를 유입하고, 오염된 공기를 포함하여 건물에서 오염된 공기를 제거하도록 설계되어 있다. 만일 그것이 일시적으로 작동하지 않으면 작업자는 후드 내에 있는 화학물질에 노출될 수 있다.

(2) 후드의 형태

후드는 챔버(chamber), 앞면(face), 및 배출부(exhaust) 등 3가지 기본요소를 가지며, 전형적인 모양을 [그림 2]에 나타내었다. 챔버(chamber)는 작업장소이다. 저부, 외부가 있고 작업자가 일하는 곳 등이다. 그것은 3개의 벽과 탑(top)으로 둘러싸여 있고 내면(lining)은 화학물질에 저항성이 있다. 챔버는 물, 가스, 전기, 스팀 공급을 위해 연결배선이 있으며, 대부분의 후드가 가스나 전기를 위해 외부 배선이나 접속관을 갖는다. 방사성 동위원소(radiosotopes), 발암물질(carcinogens), 과염소산(perchloric acid)을 위한 후드는 유출의 누설을 방지하기 위해 단단하게 만들어진 liners로 만들어져 있다.

<표 1> 사용목적에 따른 실험실 후드의 특징

형 태	목 적	특 징
일반적	다목적	다양한 액세서리 이용가능
walk-in or Floor	큰장치, 특별한 종류	- 노면의 단계, 크기. - 편리한 큰 장비. - 장치를 설치하기 쉬움. - 작동중에 안에 들어갈 수 없음
과염소산	반응성 높고 폭발하기 쉬운 화학물질에 쓰임	- chamber에 내층 있음. - 폭발저항성. - 규칙적 정화를 위한 헹군 시스템
방사성동위원소	특별한 물질 취급	- 유출 억제하는 내층 있음. - 배출닥트의 특별한 필터
발암물질	특별한 물질 취급	- 유출 억제하는 내층. - 내층 정화가능. - 배출닥트의 특별한 필터
방폭	폭발하기 쉬운 가연성 물질	- 저항 물질이 있는 특별한 구조. - 방폭 팬

앞면(face)은 하나 혹은 그 이상의 깨끗한 “문(doors)"나 sash를 갖는다. 어떤 후드에서 샤시(sash)에 경첩이 달려있고 개방되어 있다. sash 슬라이드는 수평이거나 수직이다. sash는 후드 내부에 공기를 유지하도록 돕는다. 역류의 위험을 감소하기 위해 가능한 많이 sash를 닫는다. sash는 반응이 끝날 때 작은 사고와 물질의 튐으로부터 보호될 수 있다. 방폭 후드의 sash는 격렬한 반응에 저항할 수 있게 설계되어야 한다.

후드의 배출시스템이 또한 중요하다. 배출시스템은 작업자에게서 공기를 멀리 보낸다. 배출닥트는 챔버(chamber)의 위쪽에 위치한다. 이것은 후드 안쪽을 통해 흐르는 공기의 패턴을 좌우하며, 유해물질의 노출수준이 증가하는 것을 방지한다. 닥트에 있는 고성능의 팬이나 송풍기는 공기를 흡입하는 일을 한다. 송풍기의 가장 효율적인 위치는 건물의 지붕 위나 공기를 흡입하는 것을 필요로 하는 곳이면 된다. 닥트는 화학물질에 견딜 수 있는 재질로 만들어야 한다. 그러나 닥트는 부식에 의해 위험해질 수 있다. 닥트는 종종 지붕에서 외부로 나가기 전에 건물내에서 가동될 수 있다. 만일 누출된 구멍이 의심되면 닥트는 주기적으로 점검해야 한다.

가장 간단한 배출 시스템은 외부 공기에 곧바로 배출하는 것이다. 공기중의 잠재위험은 대기 중에 안전한 수준으로 희석되어진다. 폭발하기 쉽거나 가연성 화학물질을 취급하기 위한 후드는 스파크가 일어나지 않는 팬을 갖아야 한다.

챔버(chamber)에서 난류는 불규칙한 공기 흐름에 의존하며, 내부 방해물은 공기 흐름을 분할한다. 이것은 챔버(chamber)를 통한 균일한 공기 흐름을 유지하기 위해 난류를 감소시킨다. 새로운 후드는 공기포일(air foil), 슬릿(slit), sash 위에 있는 bypass가 있다. 이것은 면속도(face velocity)를 일정하게 유지시킨다.

후드 관리는 배출덕트, 송풍기 등의 검사는 전문가에게 위임하는 것이 좋다. 필터는 검사하거나 교체할 수 있다. 후드의 검사는 전문가에 의해 매년 검사를 할 수 있다. 검사자는 후드에 면속도와 검사일을 포함한 표를 부착할 수 있다. 작업자는 매일 작업자의 후드를 사용하기 전에 내부(chamber)나 표면(face)을 검사할 수 있다. 닥트 내의 누설된 곳은 후드의 속력을 감소시킬 수 있다. 대부분 후드의 면속도는 화학물질의 양이나 후드의 형태에 의존한다. 좀 더 센 속력은 후드 내 공기흡입을 더 잘할 수 있고 역류를 제거할 수 있다. OSHA에서는 면속도를 최소 125fpm(38m/min)에서 150fpm(46m/min)을 권고하고 있다.

(3) 적당한 후드 사용

만일 작업자가 적절한 후드를 사용하지 않는다면 역류로부터 화학물질에 노출될 수 있다. 대부분 후드의 잘못된 사용은 저장 공간처럼 후드를 사용하는 것이다. 대부분 난류의 원인은 역류이다. 작업자를 비롯한 후드의 앞에 있는 모든 것은 공기 흐름의 장애물로서의 역할을 할 수 있다. 후드의 근처에 보관되어 있는 약품이나 사용하지 않은 장치나 물건은 치워야 한다. 실험실이나 후드 정면에서 공기형태의 갑작스런 변화는 역류를 발생할 수 있다. 후드는 절대로 환기 닥트나 열려진 창문, 문 근처에 위치해서는 안 된다.

<표 2> 후드의 적절한 사용을 위한 체크포인트

o 사용하기 전에 매일 후드 검사한다. o 후드에 머리를 넣지 말고, 작동되는 동안 walk-in 후드내에 들어가지 마라. o 후드 앞에서 바람을 일으키지 마라. 창문이나 문은 닫아둔다. 실험실 내·외에서 잡자기 문을 열지 말고 후드 근처에서 갑작스런 움직임을 피해라. o 만일 환기 시스템이 기능불량이라면 후드의 작동을 멈춰라. o air foil과 조절장치의 구멍으로부터 모든 물체를 떨어뜨려 놓는다. o 모든 물체는 chamber내에서 적어도 6인치를 유지한다. o 작업자가 적절한 면속도와 최소노출로 안전하게 작업하고자 할 때는 sash를 가능한한 닫아둔다. o 후드가 작동중이고 위험하지 않을 경우에는 sash를 닫아놓는다. o 후드는 저장을 위한 것이 아니다, 불필요한 물건을 치워라. o 열, 화염, 스파크의 원인이 될 수 있는 곳이나 뜨거운 금속판 근처에 가연성 용제(solvent)를 두지 말아라. o 적합하게 작동하지 않는 후드는 사용하지 마라 o 만일 다른 보호장치가 필요하다면 실험실 차폐물(shield)을 사용해라 o sash와 baffle를 제거하지 마라. 만약 공간상에 문제가 있으면 큰 후드를 사용해라

(4) 생물학적 안전캐비닛(Biological Safety Cabinets, BSC)

생물학적 안전캐비닛(BSC)은 공기 중의 에어로졸을 포함하는 박테리아나 바이러스로부터 작업자를 보호한다. 외부에 있는 후드와 비슷하다. 어떤 것은 일정한 상태하의 화학물질 취급을 위해 사용되지만 이것은 조심해야 한다. 작업자의 상급자와 함께 체크하고 BSC이 작업자가 취급하는 화학물질에 안전하다는 것을 알 수 있다.

BSC는 다른 후드와는 좀 다르게 작동되고 설계되어 있으며 구성되어 있다. 어떤 형태는 0.3μm 보다 작은 공기 중의 입자가 99.97%에 이를 수 있게 움직임이 가능한 고효율성의 공기 미립자(High efficiency particulate air, HEPA)필터를 사용한다. 이 필터는 화학물질의 fume, 먼지, 증기에 대해서는 쓸모가 없다. 어떤 BSC는 후드보다 표면속도가 더 낮다. 대부분의 경우 chamber내의 공기를 재순환시킨다.

생물학적 안전캐비닛(BSC)은 공기 중의 생물학적 잠재위험의 다른 단계를 위한 여러 가지 설계를 이용할 수 있다. 미국 국립위생재단(National Sanitation

Foundation, NSF)는 생물학적 안전캐비닛의 분류를 <표 3>와 같이 3 등급으로 나누었다.

<표 3> 생물학적 안전캐비닛의 분류

분류	재순환 공기(%)	전형적인 면속도 (fpm)	특징
class Ⅰ	0%	75~100	오염으로부터 작업자보호, 어떤 단위는 실험실내에서 배출
class Ⅱ A	70%	80~100	공기중의 화학물질을 위한 것이 아님, 필터는 내부를 청결하게 함, 어떤 단위는 실험실내에서 배출
class Ⅱ B_1	30%	80~100	필터는 내부를 청결, 화학물질을 위한 것은 아님
class Ⅱ B_2	0%	80~100	공기 재순환 않음, 어떤 단위 실험실내에서 배출, 적당한 필터를 갖거나 외부로 배출하기 위한 화학물질을 위해 사용
class Ⅱ B_3	70%	100	공기중의 화학물질을 위한 것은 아님, 모든 단위 외부에서 배출
classⅢ	0%	n/a	밀봉된 슬리브와 글러브를 통해 작동, 글러브박스, air tight

어떤 BSC는 chamber내에서 취급하는 물질의 오염을 방지한다. 이 장치는 화학물질을 위해 사용되지는 않는다. 송풍기는 캐비닛에 설치한다. 공기는 송풍기를 통과하기 전에 필터를 통과한다. 어떤 것은 배출닥트 밖으로 힘이 작용하는 동안 chamber내의 공기와 섞이거나 재순환한다. 화학물질은 필터를 통과하고 송풍기내의 팬을 부식시킬 수 있다. 또한 chamber내에 집중되거나 재순환할 수 있다.

흄(fume)후드와 비슷한 BSC는 일상적으로 점검해야 한다. 면속도는 분기별로 결정해야 한다. 면속도 결정방법은 다른 후드와 차이가 있는데 그 이유는 설계에 차이가 있기 때문이다.