

# 생물안전실험실의 주요 설비와 자동제어

■ 주영덕 / (주)나라컨트롤, ydju@naracontrols.co.kr

바이오 특수 실험실의 주요 설비를 소개하고, 각 설비를 효율적으로 통합 운영하기 위한 자동 제어 로직을 소개한다.

## 생물학적 안전(Biological Safety)과 생물학적 안전수준(Biological Safety Level)

생물학적 안전(Biological Safety)이란 감염 및 전파활동을 통해 생물체에 위해를 가할 수 있는 '감염 원으로서의 병원체(바이러스, 유전자변형생물체 포함)'로부터 숙주를 보호하는 행위를 말한다. 생물학적 안전수준(Biological Safety Level)은 생물체의 감염성, 위해성 유무와 정도를 분석하고 그 결과에 근거하여 종합적인 위해성 정도를 등급별로 구분한 것인데, 총 4개의 단계가 존재한다. 일반적으로 생물학적 안전을 확보하기 위해서는 생물실험절차(Microbiological Practices), 안전장비(Safety Equipment), 안전시설(Facility Safeguards)등의 3요소가 고려되며, 상호보완적인 형태로 구성된다. 다음은 생물학적 안전수준 단계에 대한 개략적인 사항이다.

- 생물학적 안전수준 1(Biological Safety Level 1)  
: BL 1  
건강한 성인에게는 일반적으로 질병의 원인이 되지 않는 다고 알려진 병원체에 적용되며, 안전장비 및 안전시설에 대한 사항은 고려되지 않는다.
- 생물학적 안전수준 2(Biological Safety Level 2)  
: BL 2  
건강한 성인에게 질병을 일으킬 수 있으나, 그 증상이 경미함과 동시에 효과적인 치료약 혹은 백신이 존재하고, 공기 중의 에어로졸을 통한 전염이 이루어지지 않는 병원체에 적용된다.

- 생물학적 안전수준 3(Biological Safety Level 3)  
: BL 3  
건강한 성인에게 심각한 질병을 일으킬 수 있으며, 공기 중의 에어로졸을 통한 전염 가능성이 있는 생물체에 적용된다.
- 생물학적 안전수준 4(Biological Safety Level 4)  
: BL 4  
건강한 성인에게 생명을 위협하는 치명적인 질병을 유발할 수 있으며, 에어로졸을 통한 전염력을 가진과 동시에 그 전염성이 매우 높아 지역 사회의 공중보건에도 치명적인 위협이 될 수 있는 생물체에 해당한다.

생물학적 안전수준에 관한 자세한 정의 및 기타 제반사항에 관해서는 WHO- Laboratory Biosafety Manual 3th Edition, NIH-NIH Guidelines for Research Involving Recombinant DNA Molecules 등을 참고하기 바란다.

## 생물안전실험실(Biological Safety Laboratory)

생물안전실험실(Biological Safety Laboratory)이란 생물학적 안전수준(Biological Safety Level) 등급에 기초하여 취급하고자 하는 위해성 병원체 및 실험내용을 종합적으로 고려한 제반 업무 행위가 이루어지는 시설물을 말하며, 그 근본적인 목적은 잠재적으로 유해한 병원체를 밀폐(Containment)하여 병원체로부터 실험자와 시설 주변 환경을 보호함과 동시에 보편성과 재현성을 가진 실험결과를 도출할 수 있도록 실험자에게 최적의 실험환경을 제공하는 것에 있다. 때문에 생물안전실험실은 시설을 구성하는(안전, 실험) 장비는 물론 설비, 생물학적 안전수준을 고려한 전체적인 시설물 설계 및 건축물이 모두 포함된다.



보통 2중의 배리어(Barrier)를 구성하여 병원체의 위험성을 차단하는 것이 생물안전실험시설에서의 일반적인 안전성 확보의 기본 전략인데, 생물안전 작업대(BSC, Biological Safety Cabinet), 개인보호 장구(Personal Protective Equipment; 글러브, 실험복, 안면보호기, 안전고글, 산소호흡기 등이 해당됨) 등이 일차적인 배리어를 구성하여 실험자와 병원체 사이의 직접적인 접촉을 차단한다면, 시설은 이차적인 배리어를 구성하여, 실험자와 실험실 외부의 환경, 넓게는 인간 및 동물 생태 환경을 병원체로부터 보호하는 역할을 한다. 그림 1은 각각 생물안전실험시설에서 주로 사용되는 Class II A2, Class II B2, Class III 타입의 생물안전작업대의 개략도를 보여주고 있다.

생물안전실험실은 생물학적 안전수준 등급에 기초하여 총 4단계의 시설물로 구분된다. 기본적으로, 각 시설의 특징들은 시설에서 다루는 병원체의 전염성에 의해 결정되는데, BL-1, BL-2 등급 시설의 경우에는 병원체와의 직접 접촉이 주 감염경로가 되기 때문에 시설을 공공통로에서 분리시키고, 멸균시설을 구비하며, 핸드워싱 시설 등을 배치하는 것으로 구성할 수 있지만, 에어로졸을 통한 전염 가능성을 가진 병원체를 다루는 BL-3, BL-4 등급 시설의 경우에는 전염성 병원체가 공기를 통해 시설에서 외부로 누출되는 것을 방지하기 위해 여러 가지 밀폐 시설적인 특징들을 보이게 된다. 이러한 특징들은 다음과 같다.

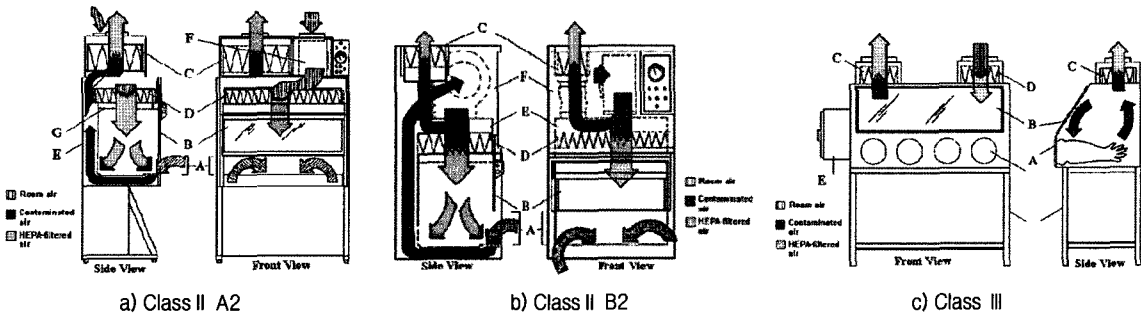
- 1) 공기흐름(Airflow)을 제어하기 위해 특화된 환기시스템

- 2) 시설 내부에서 외부로 배출되는 공기에서 병원체를 제거하기 위해 특화된 공조 시스템.
- 3) 접근제한장치 설치
- 4) 실험실 출입구의 에어록(Airlock)
- 5) 실험시설을 기타 다른 시설들로부터 격리하기 위해 분리된 건물, 모듈 구성
- 6) 병원체를 다루는 모든 실험절차들은 생물안전 작업대 내에서 진행해야 한다.

### 생물안전실험실의 주요 설비

생물안전실험실의 특징을 등급별로 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- 생물안전1등급 실험실 (BL-1 Laboratory)  
별도의 특별한 설비 시설을 필요로 하지 않으며, 실험자가 기본적인 개인보호장비를 착용하는 것을 권장한다.
- 생물안전2등급 실험실 (BL-2 Laboratory)  
병원체를 포함한 에어로졸이 발생할 수 있는 경우에는 생물안전작업대 사용을 권장한다. 시설은 공공복도에서 분리된 별도의 구획에 설치되어야 하며, 별도 공조시스템을 적용할 것을 권장한다.
- 생물안전3등급 실험실 (BL-3 Laboratory)  
본 등급의 시설부터는 실험자와 시설, 시설 주변 환경 등을 병원성 에어로졸로부터 보호하기 위해 보다 강화된 일차적 배리어와 이차적 배리어를 설치해야 한다. 병원체를 다루는 모든 실험들은 생물안전작업대와 같은 밀폐 장비 내



[그림 1] 생물안전작업대의 개략도

부에서 진행해야 하며, 실험실 출입은 엄격히 통제되어야 한다. 감염성 에어로졸이 실험실 내부로부터 외부로 누출되는 것을 차단할 수 있도록 시설에는 공기 흐름을 조정 할 수 있는 공조시스템이 설치되어야 하며, 실험실 입구에는 실험실 내부의 기류상태를 모니터링 할 수 있는 장치가 설치되어야 한다. 시설에서 배출되는 공기는 HEPA 필터(HEPA Filter, HEPA; High Efficiency Particulate Absorbing)를 통해 배출되어야하며, 공조시스템 이상을 인지할 수 있는 경보시스템을 갖추어야 한다. 생물안전작업대가 동작 할 경우 실내 공기 흐름에 영향을 주지 않도록 시설의 공조시스템과 연동될 수 있도록 구성해야 한다.

• 생물안전4등급 실험실 (BL-4 Laboratory)

BL-4 등급의 실험실은 BL-3등급의 실험실과 같은 조건에서 좀 더 강화된 시설 특징을 보인다. 실내는 완전한 기밀을 유지해야하는 것이 기본적인 특징이며, 실험자는 Class III BSC에서 작업을 실시하거나, 공기가 공급되는 양압복을 착용하여 감염성 에어로졸로부터 완전히 차단되어야 한다. BL-4 등급의 실험실은 독립

건물로서 지어지거나 특정 건물 내에 위치하는 경우에는 기타의 공간과는 완전하게 격리되어야 한다.

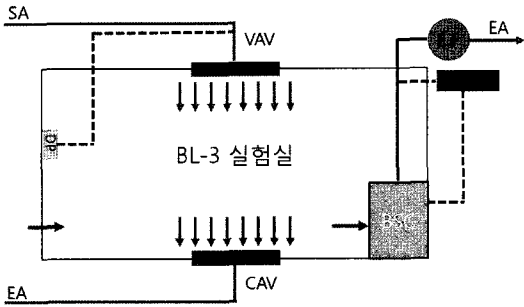
생물안전실험실의 자동제어 구축

안전성 확보를 위한 생물안전실험실의 주요 설비는 크게 두 가지 측면으로 나누어지게 되는데, 병원체의 봉쇄를 위한 배리어로서의 설비와 정전 및 천재지변으로 인한 비상상황 발생 시 병원체의 위협을 배제하기 위한 설비로 나뉘어질 수 있다. 또한, 생물안전실험실은 공조 시스템의 특성상 전외기 방식을 적용하는 경우가 일반적이기 때문에 기타의 시설보다 에너지 소모량이 많은 편인데, 안전성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 에너지 절감을 위한 설비를 추가하는 것이 유리하다. 이러한 모든 설비들을 통합관리 하여, 안전성을 극대화하고 실험자에게 최적의 실험환경을 제공하며 에너지와 운전비를 절감하는 것이 생물안전실험시설에 있어 자동제어설비의 역할이라 하겠다.

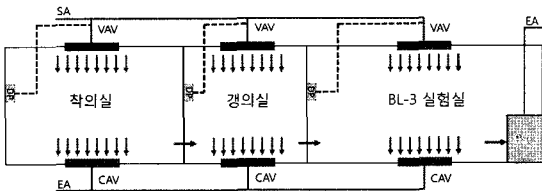
생물안전 밀폐실험실의 원활한 설치와 운영을 위해서는 제어 기능의 목표를 명확히 하는 것이 중요

<표 1> 주요시스템 제어 목표

구 분	제어 목표						
	실험실 최적환경	실험동물 최적환경	연구원 안전	신뢰성, 안전성	에너지 절감	유연성 확장성	유지관리 편의성
실간차압설정	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
급기풍량제어	◎	◎		◎	◎	◎	
차압제어	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
청정도제어	◎	◎		◎	◎	◎	
공조기팬제어	◎	◎		◎	◎	◎	
BSC 제어			◎				◎
급수제어	◎	◎		◎	◎	◎	
배수제어	◎	◎		◎	◎	◎	
온도제어		◎				◎	
습도제어	◎	◎		◎	◎	◎	
조도제어	◎	◎		◎	◎	◎	
분산제어	◎	◎		◎	◎	◎	
경보시스템			◎				◎



[그림 2] MAKE-UP AHU



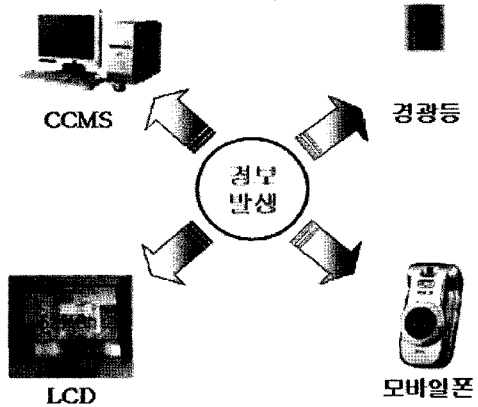
[그림 3] 실험실 공조 시스템

하며, 표 1과 같이 각 목표를 구분하여 시스템을 구성해야 한다.

**공조 시스템, 생물안전작업대 연동 시스템 구축**  
 전술한 바와 같이 BL-1, BL-2 등급 실험실의 경우 별도의 특별한 설비가 구축되어 있지 않기 때문에 자동제어설비 또한 특별히 고려할 사항이 없다. 다만 BL-2 등급시설 부터는 실험실 내부에 생물안전 작업대가 설치되기 때문에, 그러한 경우에는 실내 공기 흐름의 안정화와 실험자의 안전을 위해 생물 안전작업대 인입공기량과 배기량을 고려하여, 이를 공조시스템과 연동하는 작업이 필요하다. 그림 2는 생물안전작업대 연동을 위한 Make-up 공조기 제어를 보여주고 있다.

**차압제어**

차압제어는 공기의 흐름에 의한 오염을 방지하기 위한 장치로서 실간 차압 제어를 권장한다. 실간 차압은 사람의 동선과 물품의 동선에 따라 설계하



[그림 4] 생물안전실험실 경보시스템 개략도

며 생물안전실험실의 특성상 5초 이내의 빠른 응답 속도와 정밀도  $\pm 5\%$  이내의 정밀한 제어를 요구한다. 생물안전 3등급의 제어구성은 그림 3과 같이 각 실별 제어를 실시하고 있으며 안정된 차압 환경을 유지하기 위하여 급기 풍량과 배기 풍량 제어를 하고 있다. 또한 기타 FMS 시스템과 연계되어 항상 음압을 유지하여 오염사고를 방지한다.

**독립분산제어**

자동제어 설비는 시스템의 안전성을 위하여 각 실험실 별로 독립적인 제어를 하도록 하고 있다. DDC 패널에 집중된 제어 시스템은 일부 고장이 전체 실험실로 확산될 위험성이 있기 때문에 각 실별 독립분산 제어가 타당하다.

**경보시스템구축**

자동제어 시스템에 문제가 발생하였을 경우 그림 4와 같이 경보를 내부에 있는 실험자나 아니면 외부에 있는 관리자에게 빠르게 전파할 수 있는 대책을 강구해야한다. 또한 정전이나 천재지변 발생 시 최소한의 음압을 형성하여 실험실을 안전하게 폐쇄할 수 있게 자동제어 설비 및 공조 설비 실험 장비에 무정전 전원공급이 될 수 있게 한다. 그리고 전원 부분의 설계 고려도 필요하다. Ⓣ