

바이오 클린룸용 에너지 절감을 위한 공조 시스템

○ 김 진 | (주)나라컨트롤, 에너지플랜트(E/P)사업부
상무이사
E-mail : jkim@naracontrols.co.kr

1. 서론

바이오 클린룸은 분진 등의 입자상 오염 물질을 제어하는 것을 주목적으로 하는 산업용 클린룸 (Industrial Clean Room)과는 달리 바이러스, 세균, 곰팡이 등의 생물성 입자에 의한 오염을 제어하는 것을 주목적으로 하고 멸균을 병행하는 설비로서 바이오 클린룸 설비의 응용분야는 SPF¹⁾ 실험동물 사육실, 병원의 수술실, 식품제조공정, 화장품 등의 청정실과 실험자에 대한 감염방지나 오염원의 실험실 외부로의 유출을 방지하는 생물안전밀폐 실험실 (Bio Hazard)등을 비롯한 제약(GMP²⁾)시설 등에 폭 넓게 응용되고 있다.

최근 바이오 관련 산업이 급격히 성장함에 따라 인체 유해 요소에 대한 관심이 집중되고 있으며 특히 메르스나 신종 인플루엔자 등 인다양한 전염병의 출현으로 인해 바이오 클린룸을 통한 질병관리 및 생명공학에 관해 국내에서도 관심이 급증하고 있어 바이오 클린룸의 보급은 급격히 증가하고 있는 실정이다.

이러한 바이오 클린룸 관련 기술의 발달과 더불어

어 국제적으로 안전 보호 장치를 마련하고 있는 실정이며 정부에서도 생물안전에 관련된 각종 설비에 대한 기준 제정에 주력하고 있으며 최근에는 생물 안전실험실 분야에 대하여 일정 등급 이상의 인체에 유해한 균을 취급하는 경우 국가 지정 기관에서 설비에 대한 심의를 받도록 규제를 강화하고 있다.

2. 바이오 클린룸

2.1 바이오 클린룸의 분류³⁾

바이오 클린룸은 설치 목적에 따라 그림 1과 같이 분류할 수 있는데 일반적인 공조 시스템의 경우 일부의 공기는 실내의 공기로 재순환하고 부족분만큼 외기를 도입하는 부분 외기 도입 방식을 사용하고 있는데 반하여 바이오 클린룸의 공조 시스템은 실내의 청정도 유지 및 오염방지를 위해 실내 공기를 재사용하지 않고 전부 외기로 배기 시키는 전외기 공조방식을 적용함과 동시에 오염방지를 위해 HEPA⁴⁾ Filter, 에너지 회수를 위한 현열 교환기 등을 적용한다.

1) SPF : Specific Pathogen Free
2) GMP(Good Manufacturing Practice) : 우수 의약품 제조관리 제도
3) ABSL, BSL : (Animal) Biosafety Level 생물안전등급
GLP(Good Laboratory Practice) : 우수실험실운영기준
4) HEPA : High Efficiency Particulate Air

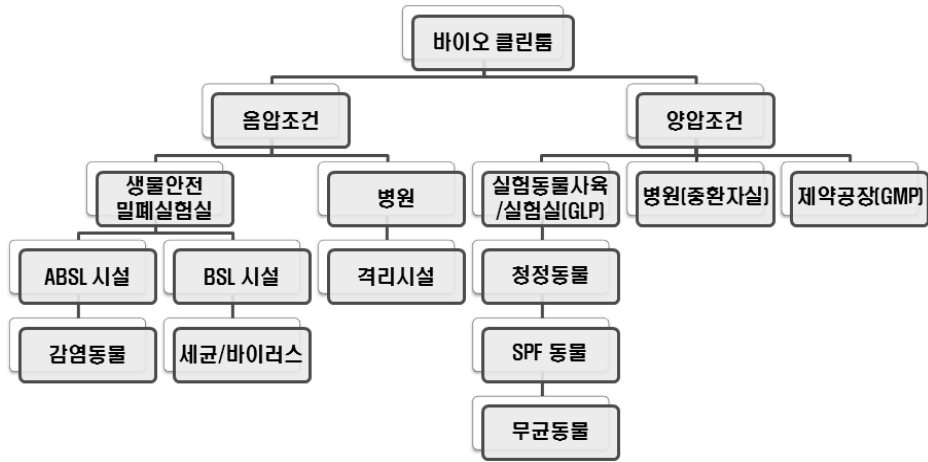


그림 1. 바이오 클린룸 용도별 분류

2.2 바이오 클린룸의 특성5)

실내 공기의 청정도나 오염방지를 목적으로 하는 바이오 클린룸의 특성상 일정 수준 이상의 환기 횟수를 유지하여야 하는데 특히 생물안전 3등급 시설의 경우 최소 10회/hr 이상, 실험동물사육실은 일반적으로 15~20회/hr 정도의 높은 환기 횟수를 유지하고 있는 실정이며 그림 2와 같이 전외기 방식을 적용함에 따라 에너지 소비가 매우 큰 것으로 나타나고 있다.

이렇듯 바이오 클린룸 공조 시스템은 실내 공기 청정도 유지 및 생물학적 안전을 최우선시하기 때문에 일반 공조시스템과 달리 구조적으로 실내 공기의 환기 횟수가 월등히 많아야 하고, 1년 365일 연중무휴로 운영이 되기 때문에 일반 공조시스템에 비해 많은 에너지가 소비된다는 것을 알 수 있다.

차후 바이오 클린룸의 보급이 확대될 경우 그에 따른 에너지 소비 확대로 인해 시설의 안정성을 유

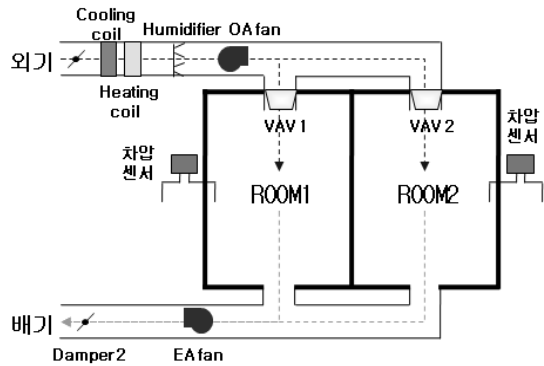


그림 2. 바이오 클린룸 환기 시스템 구성

지하면서 에너지 절약적인 가동을 할 수 있는 방법이 중요한 이슈로 부각될 가능성이 매우 높다.

이러한 에너지 낭비를 줄이기 위하여 본 원고에서는 배기열 회수를 이용한 에너지 절감형 바이오 클린룸용 공조 시스템을 소개하고자 한다.

5) OA(Outside Air) fan : 외기팬
EA(Exhaust Air) fan : 배기팬
VAV(Variable Air Volume) : 변풍량

2.3 시스템 개요

에너지 절감형 바이오 클린룸용 공조 시스템은 히트펌프를 이용한 배기열 회수기술을 적용한 시스템으로, 열회수시 발생할 수 있는 급·배기 간 교차 오염(Cross contamination)을 방지하며 배기가 가지고 있는 배기 열을 회수하여 에너지 절감을 극대화하는 기술이다.

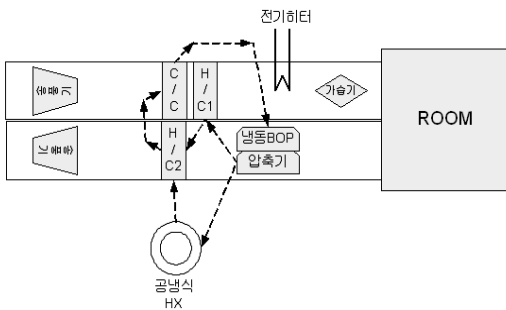


그림 3. 히트펌프를 이용한 배기열 회수기술 (냉방시)

그림 3은 냉방시 히트펌프를 이용한 배기열 회수기술의 기본 원리를 도식화한 그림이다. 히트펌프에서 가장 중요한 냉매의 흐름을 살펴보면 다음과 같다.⁶⁾

① 압축기로부터 생성된 고온 고압의 냉매 가스는 유분리기, 4방 밸브를 차례로 거쳐 공조기 부분으로 이동한다.

② 배기팬 유닛에 설치되어지는 배기열 회수 코일과 공조기 재열코일 및 실외기 코일에서 냉매가 응축 된다.

③ 수액기를 통과한 냉매는 냉각코일로 들어가 기 전 팽창밸브를 통해 팽창을 하고 냉각코일에서 증발한다.

④ 냉매는 수분리기를 거쳐 압축기 내부로 흡입되어 순환 된다.

6) BOP(Balance of Plant) : 주변보조기기
HX(Heat Exchange) : 열교환
7) CMH(Cubic Meter per Hour) : 단위시간당 풍량

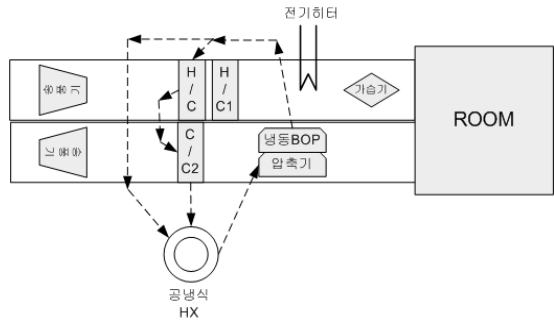


그림 4. 히트펌프를 이용한 배기열 회수기술 (난방시)

그림 4는 난방시 히트펌프를 이용한 배기열 회수기술의 기본 원리를 도식화 한 그림이다. 난방시 히트펌프에서의 냉매의 흐름은 압축기에서 토출되어 4방 밸브까지 이동할 때까지의 냉매 흐름은 냉방시와 동일하게 진행하나, 그 이후의 냉매 흐름은 4방 밸브의 작동으로 냉방의 경우와 반대의 방향으로 진행된다.

① 4방 밸브에서 토출된 고온 고압의 냉매 가스는 난방 코일에서 응축을 하여 열을 발산 한다.

② 냉매는 배기팬 유닛에 설치되어지는 배기열 회수 코일에서 증발하는 순서로 압축기로 다시 흡입되어 순환이 계속적으로 반복 한다.

2.4 실험장치 구성

배기열 회수를 이용한 히트펌프 공조시스템의 성능시험을 위하여 시뮬레이션 토대 기술과 데이터로 설계를 진행하고 나라컨트롤 평택공장에 제작설치를 하였으며 시험장치의 용량은 장소와 제작 여건을 고려하여 냉동용량 30RT, 급기풍량 5,000CMH⁷⁾로 제작하였다.

기존 냉방 시스템에서의 CDU⁸⁾ 역할을 하는 실외기는 향후 하절기와 동절기의 구분 시험을 위하

여 실외에 2대 실내에 2대를 각각 설계하였다. 또한 공조기는 바이오 클린룸의 전외기 공조 방식의 특징에 따라 냉방코일, 급기팬을 포함하고 있는 급기용 공조기와 배기열 회수 코일, 배기팬을 포함하는 배기팬 유닛으로 구분하여 설계하였다.



그림 5. 히트펌프를 이용한 배기열 회수 공조시스템

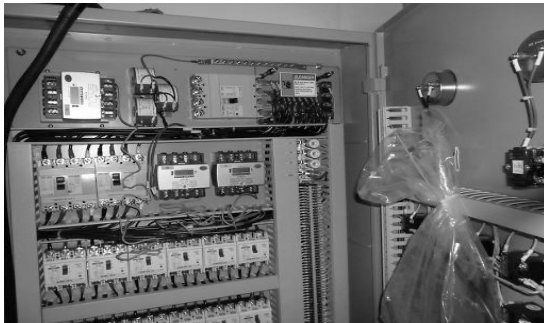


그림 6. MCC 제어반

냉방코일의 용량은 91,000kcal/h, 난방코일의 용량은 57,000kcal/h, 열회수 코일의 용량은 40,000kcal/h로 각각 설계하였으며, 급기팬은 5,000CMH의 풍량과 60mmAq의 정압을 가지고, 배기팬은 5,000CMH의 풍량과 40mmAq의 정압을 가지는 것으로 설계하였다.

추가적으로 바이오 클린룸의 일반 공조시스템과 개발 시스템과의 성능을 시험하기 위하여 개발 시스

8) CDU(Condensing Unit) : 콘덴싱 유닛

9) USRT(US Refrigeration Ton) : 미국 냉동톤(3,024 kcal/hr)



그림 7. 외기 덕트(공조기)

템에 항온항습기를 구비하고 공조기 내에 전기전열 코일을 설계하였다. 또한, 당초 계획은 5,000CMH의 풍량이 실내기 챔버의 체적에 적당하다고 판단하였으나 시운전에 따라 실내 온도의 급격한 변화가 발생하여 실내기 챔버의 해당 범위를 밸브성능시험실까지 확대하고 급기 덕트의 공기 취출 방향을 수평으로 조정하였다. 실제 성능시험장치의 운영방식은 다음과 같이 구분된다.

- ① 감온식팽창밸브(TXV)를 이용한 방식
- ② 전자식팽창밸브(EXV)를 이용한 방식
- ③ 동절기시 전기히터를 통해 난방하는 방식
- ④ 하절기시 열회수코일을 사용하지 않고 실외기를 통해 냉방하는 방식

①과②의 방식은 히트펌프 시스템을 이용하는 것이고, ③과 ④의 방식은 히트펌프 시스템 대비 에너지 절감 효율을 산정하기 위한 기존의 운영 방식이다.

2.5 에너지 절감 효과

에너지 절감형 바이오 클린룸용 공조 및 제어 시스템의 에너지 절감효과는 다음과 같은 최대 부하량 30 USRT⁹⁾의 시험실 현장의 데이터를 토대로 작성되었다.

표 1. 외기온도에 따른 배기열 회수 공조기의 사용전력량

평균 외기온도 (±1℃)	사용 전력(Kw/h)									평균 사용전력 (Kw/h)	2℃당 상승률 (%)
	1/5	1/6	1/6	1/7	1/12	1/12	1/13	1/30	2/1		
-9				28.4					24.9	26.7	11.7
-7	24		24.5		24.3			23.4	23.1	23.9	14.3
-5	21.3	20.7	20.9		19.4			22.1		20.9	29.5
-3		18.2	16.9		17.9				11.5	16.1	8.4
-1		15.4	23.7		15.1	10.2			10	14.9	55.0
1					10					9.6	14.3
3									8.4	8.4	

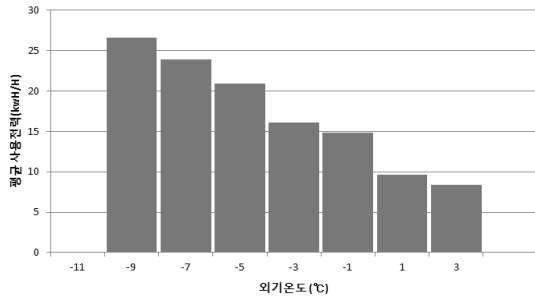


그림 8. 외기온도에 따른 배기열 회수 공조기의 사용전력량 그래프

배기열 회수 기술을 이용한 공조 시스템의 성능은 외기온도에 따라 그 차이가 나타나므로 외기 온도 2℃의 변화에 따른 배기열 회수 성능을 데이터로 확인하였다. 실험실의 실내 설정온도는 22℃로 고정하였으며, 그 결과는 표 1과 같고, 그래프로 표현하자면 그림 8과 같다.

데이터의 외기온도 분포는 -9℃~3℃이며, 데이터를 분석한 결과 평균적으로 외기온도가 2℃ 상승함에 따라 사용전력량은 평균적으로 약 20% 정도씩 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

이를 다시 에너지 비용으로 환산하고, 그 에너지 비용을 난방 열원별(전기코일, 증기난방)로 비교를 해보면 표 2와 같으며, 그 그래프는 그림 9와

같다. 에너지 비용을 기준으로 비교 결과, 전기코일로 난방을 했을 경우와 비교했을 경우에는 평균적으로 약 64%의 에너지 비용 절감율을 나타냈고, 증기보일러를 이용하여 난방을 했을 경우와 비교했을 경우에는 평균적으로 약 66%의 에너지 비용 절감율을 나타내었다.

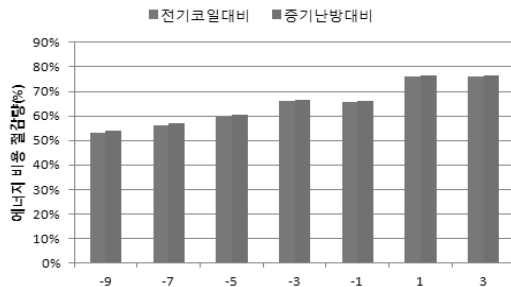


그림 9. 외기 온도에 따른 난방 열원별 사용 에너지 비용 비교 그래프

3. 결론

바이오 클린룸 분야의 공조시스템은 현재까지 에너지 효율을 고려하기 보다는 바이오 클린룸 내부에서의 오염방지 및 교차오염(Cross contamination)방지가 우선적인 설비 및 제어 시스템이 보급되고 있었으나 많은 실험실들이 24시간 365일 운전 에 따른

표 2. 외기온도에 따른 난방 열원별 사용 에너지 비용

평균 외기온도 (±1℃)	히트펌프시스템	전기코일	증기난방	절 감 량	
	평균사용전력 (kw)	사용전력 (kw)	가스사용량 (N/m ³)	전기코일 대비	증기난방 대비
	사용요금 (원)	사용요금 (원)	사용요금 (원)		
-9	26.7 ₩ 1,866	56.8 ₩ 3,977	5.0 ₩ 4,051	53.1%	53.9%
-7	23.9 ₩ 1,670	54.6 ₩ 3,819	4.8 ₩ 3,888	56.3%	57.0%
-5	20.9 ₩ 1,462	51.8 ₩ 3,626	4.5 ₩ 3,692	59.7%	60.4%
-3	16.1 ₩ 1,129	47.6 ₩ 3,331	4.2 ₩ 3,390	66.1%	66.7%
-1	14.9 ₩ 1,042	43.4 ₩ 3,037	3.8 ₩ 3,089	65.7%	66.3%
1	9.6 ₩ 672	40.0 ₩ 2,799	3.5 ₩ 2,853	76.0%	76.4%
3	8.4 ₩ 588	35.3 ₩ 2,470	3.1 ₩ 2,518	76.2%	76.7%

많은 에너지 비용으로 시설 운용에 어려움을 겪고 있다. 따라서 교차오염을 방지하고 에너지 비용을 줄일 수 있는 시스템이 요구되어지고 있었고 이를 만족시킬 수 있는 에너지 절감율이 높은 시스템에 대한 여러 가지 연구가 수행되고 있는 실정이다.

그러나, 생물안전밀폐 실험실이나 SPF 실험동물 사육실처럼 교차오염에 대한 규제나 방지가 엄격해 기존의 에너지 절감 방법을 적용하기가 어려운 실정이었다. 이에 히트펌프를 활용한 배기열 회수 기술을 적용함으로써 급배기 간 교차오염을 방지하고 하절기시 낮은 온도의 실내공기로 열회수를 하여 냉동효율을 높이고 실외기 팬의 동력을 절약할 수 있으며, 동절기시 높은 온도의 실내공기로부터 열을 회수하여 난방에 이용함으로써 에너지 절감을 극대화하고 보일러의 용량을 줄이거나 냉열원의 간소화시켜 초기 투자비를 줄일 수 있는 시너지 효과도 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 향후 본 시스템의 발전이 바이오 클린룸뿐만 아니라 산업용 클린

룸 분야에 이르기까지 에너지 절감의 초석이 되길 기대하며 이 글을 마친다.

- 참고 문헌 -

1. 에너지기술개발사업 최종 보고서. “생물학적 오염 방지와 에너지 절감 극대화를 위한 바이오 클린룸 용 공조 및 제어 시스템 개발”. 지식경제부. 2012
2. 홍진관, 2011, “바이오 클린룸의 기술동향 및 전망”. 한국설비기술 협회.
3. 김진 외, 2010, “생물안전 실험실의 자동제어 시스템 적용 사례 분석”. 대한설비공학회 하계학술 발표회.
4. 한도영 외, 2010 “바이오 클린룸 히트펌프 시스템의 수학적 모델”. 대한설비공학회 동계학술발표회.
5. 한도영 외, 2011, “지능형 알고리즘을 사용한 바이오 클린룸 히트펌프 시스템의 전자팽창밸브 제어”. 대한설비공학회 동계학술발표회.