

외피의 Passive Design 요소와 신재생에너지를 적용한 생물안전 밀폐시설의 에너지 시스템 개선방안 연구

A Study on the Energy Improvement Plan of using Passive Design with Exterior Envelopes and Renewable Energy for Bio Safety Labotratory

황지현(Ji Hyun Hwang)¹, 범 도(Bum Do)¹, 홍진관(Jin Kwan Hong)^{2*}

¹가천대학교 대학원 건축설비학과, ²가천대학교 건축설비학과

¹Department of Building Equipment and System Eng, graduate school of Gachon University, Sunnam City 461-701, Republic of Korea

²Department of Building Equipment and System Eng, Gachon University, Sunnam City 461-701, Republic of Korea

(Received May 7, 2014; revision received July 22, 2014; Accepted: August 13, 2014)

Abstract In general, the entire air supply of a bio-safety laboratory (BSL) should be exhausted on the outside to ensure bio-safety, and the air conditioning system should always be operated to maintain a difference in the room pressure. As a result, the annual energy consumption of such a building is approximately five or ten times higher than that of an office building of the same magnitude. Thus, this study applies an actual operating system that targets BSL. The energy consumption is analyzed using the Energy Plus V8.0 program (an energy analysis program), and five kinds of cases that depend on the energy consumption of the basic BSL system are also analyzed. As a result, the energy consumption in Case 1 (basic system) is of 324.95 GJ. When the basic system of Case 1 is compared to that in Case 2 (basic system+passive design with exterior envelopes), an annual energy savings of is 6.9% is achieved. For Case 3 (basic system+Photovoltaic, PV) 12.7% is achieved, and for Case 4 (Solar Geothermal Hybrid System of renewable energy, SGHS) 49.5% is achieved. If a passive design with exterior envelopes and renewable energy system (PV+SGHS) is combined, as in Case 5, the energy consumption would be 118.15 GJ. Therefore, when this last system is compared to a basic system, the passive design with exterior envelopes and renewable energy system (PV+SGHS) can reduce energy consumption by 63.6%

Key words BSL(생물안전 밀폐시설), Passive design(패시브 요소), Super isolation(슈퍼단열재), Renewable energy (신재생에너지), PV(태양광발전), Solar-Geothermal Heat Pump Hybrid system(태양열-지열히트펌프 하이브리드 시스템), 에너지 플러스 프로그램(Energy Plus program)

† Corresponding author, E-mail: jkhong@gachon.ac.kr

1. 서 론

세계적으로 자원고갈과 환경오염의 심각성에 따라 에너지 사용량 및 온실가스 발생량 저감에 대한 인식이 점차 증가하는 추세이며, 이에 따라 탄소배출 저감 및 에너지 절약 노력이 증대되고 있다. 우리나라는 세계 10대 에너지 소비국으로 총에너지 소비량의 97% 이상을 해외에서 수입하고 있으며, 1인당 에너지 소비량은 4.68백만 toe으로 미국(7.82백만 toe) OECD 평균(4.72백만 toe)다음으로 가장 높다.⁽¹⁾ 우리나라의 총에너지 소비의 약 24%를 건물이 차지하고 있으며, 지속 가능한 환경을 구현하기 위해서는 건물의 에너지 효율

을 향상시켜 건물에너지 소비량을 지속적으로 감소시키는 것이 무엇보다도 중요하다.⁽²⁾ 본 연구는 에너지 다소비의 건물인 생물안전 밀폐시설(Biosafety Laboratory, BSL)을 대상으로 하였다. 생물안전 연구시설은 실험실 내부의 오염을 방지하기 위해 24시간 연중 가동하며 전외기 급기 및 전배기를 해야 하는 특수 음압시설로서 동일 규모 일반사무소 건물에 비해 5배 이상 에너지를 소비한다고 알려져 있다.⁽³⁾ 국내에서는 Park H. J.⁽⁴⁾에 의해 CONTAM과 TRNSYS의 연동해석을 수행하여, 생물안전 3등급 연구시설에서 전외기 방식의 공조시스템을 운전할 경우와 배기시스템에 현열교환기를 적용한 경우를 비교하여 열회수에 따른 에너지 절감효과

를 분석한 바 있다. 그 결과 BSL에서 문제로 대두되고 있는 과도한 외기부하의 증가에 따른 유지운영비 문제에 대응하면서 실험실 생물안전을 바탕으로 둔 에너지 절약 설계 및 운용방안을 도출하였다.

이에 본 연구에서는 에너지 소비문제에 대응하기 위해 실제 운영되고 있는 BSL에 적용된 시스템을 대상으로 에너지 플러스 프로그램(Energy Plus 8.0 Program)을 사용하여 에너지 소비에 대한 해석을 수행하였으며, 패시브 요소(Passive design)인 슈퍼단열재(Super insulation)와 신재생에너지(PV+Solar Geothermal Heat Pump Hybrid System, SGHS) 적용 시 연간 에너지 절감에 대해 비교 분석하였다. 이러한 연구를 통해 실제 BSL를 운용함에 있어 과도한 에너지 소비에 대응하여 패시브 시스템(슈퍼단열재)+신재생에너지(태양광+태양열+지열)적용을 통한 에너지 절약 데이터를 제시함으로써 BSL에서의 에너지 절감을 위한 에너지시스템의 개선 방안을 도출하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 Energy Plus V8.0 프로그램의 개요

2.1.1 에너지 플러스 V8.0

본 연구에서는 건축적 요소와 가용한 신재생에너지 적용으로 건물의 에너지 절감 효율을 계산하기 위해 미국 DOE(Department of Energy)에서 개발한 에너지 플러스 V8.0 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 다양한 시스템 및 에너지를 사용하여 건물을 냉, 난방 하는데 필요한 에너지를 계산하는 프로그램 모듈의 집합이다. 에너지 플러스의 특징은 부하(Loads), 시스템(Systems), 설비(Plants) 부분의 내용을 통합하여 동시에 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 정확한 부하계산을 위해 사용자가 한 시간 미만의 Time Step를 정의할 수 있다.⁽⁵⁾ 또한 ASHRAE가 권장하는 열 평형법(Heat Balance Method)으로 부하계산을 진행하며, 열전도 전달함수(Conduction Transfer Functions, CTF)로 벽체, 지붕, 바닥의 순간적 열전도를 시뮬레이션하기 때문에 정확한 결과를 얻을 수가 있다. Fig. 1은 Energy Plus의 구조와 기능을 나타내고 있으며, 부하계산, 자연환기, 태양광시스템, 열쾌적도, 옥상녹화 등 다양한 해석 가능하다.

2.1.2 Open Studio

Open Studio는 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발하였으며 Energy Plus 기반으로 전체 건물 에너지 분석 프로그램이다. Open Studio는 Energy Plus IDF 파일로 부터 건물의 Surface를 편리하게 수정할 수 있도록 지원한다.

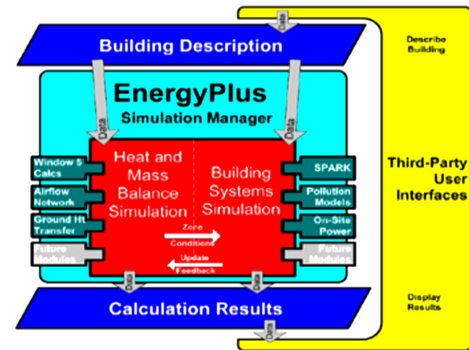


Fig. 1 Energy Plus diagram.

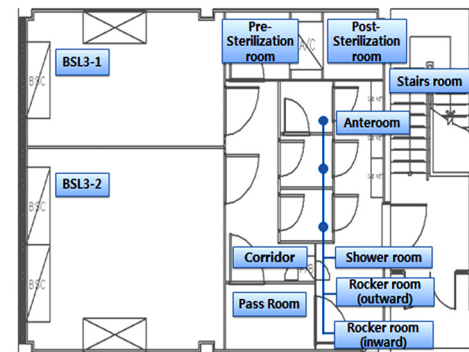


Fig. 2 Floor plan of BSL3 Lab.

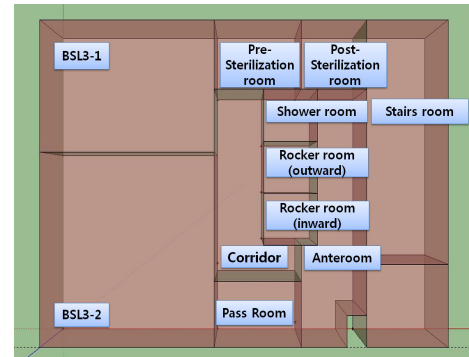


Fig. 3 Open Studio(Sketch Up add-on) Modeling of Energy Plus V8.0.

2.2 Energy Plus V8.0 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 경남 창원에 건립된 생물안전밀폐시설을 해석대상으로 하였으며 실의 면적은 BSL3-1 = 19.8 m², BSL3-2 = 29.3 m², Corridor = 9.3 m², Shower room, Rocker room(in, outward) = 2.4 m², Pass room = 5 m², Anteroom = 11.8 m² 등으로 총 114.38 m²이며, 대상 시설의 평면도는 Fig. 2와 같다.

해석대상 BSL을 Open Studio을 이용하여 건물에너지 해석 프로그램인 Energy Plus V8.0으로 Fig. 3과 같

이 모델링하였다. 대상건물은 경남 창원지역에 위치하였으나 Energy plus에서 제공하는 기상자료가 한정되어 있기 때문에 인근 지역인 울산의 기후 데이터를 적용하여 부하계산을 수행하였으며, 겨울철 및 여름철 Design Days의 입력 값은 다음 Table 1과 같다.

실내 온도는 22(±2)℃로 설정하였으며, 건물 구조체의 열관류율은 외벽 = 0.37 W/m²K, 내벽 = 0.35 W/m²K, 바닥 = 0.48 W/m²K, 지붕 = 0.35 W/m²K로 실제 구조체의 재료와 두께, 열저항에 따라 산출된 값으로 설정하였다.

생물안전 밀폐시설은 실험실 내부 오염원의 확산을 방지해야하는 특수 음압시설임에 전자기 급기 및 전배기하는 공조시스템으로 구성하였다.

Table 2는 공기조화기(Air Handling Unit, AHU)의 입력 값으로, 냉방 시에는 61.72 kW 용량을 갖는 직팽코일을 난방 시에는 41.39 kW의 용량을 갖는 난방코일을 적용하였다.

또한 각 실에서 배기된 공기를 헤파필터에 의해 여과되도록 하였고 높은 청정도를 유지하기 위하여 케이싱, 팬, 모터 등으로 구성된 장치인 클린룸용 EFU(Exhaust Filter Unit)을 3,500 m³/h인 AHU 용량과 동일하게 구성하였다.

2.3 Passive design과 신재생에너지 시스템 모델링

2.3.1 외피의 Passive design(Super insulation 적용)

BSL은 시설의 특성상 외벽에 창문이 설치되어 있지 않는 시설이므로 이중유리등 창문에서의 단열 강화조건이 본 연구에서 적용할 수가 없다. 이에 본 연구에서는 외벽과 지붕에 슈퍼 단열재⁽⁶⁾를 추가하여 외피를

Table 1 Design days input data

Information	Location	Ulsan	
		Winter	Summer
Maximum dry-bulb temperature(℃)		4.62	32.6
Daily dry-bulb temperature range(Δ℃)		11.62	9.7
Humidity condition type		Wet bulb	Wet bulb
Wet bulb or Dew point at max dry-bulb(℃)		-1.63	25.86

Table 2 Air handing unit input data

Fan	Air Volume	3,500 m ³ /h
	Static Pressure	120 mmAq
	Motor	2.25 kW
Heating Coil	Capacity	41.39 kW
DX Cooling Coil	Capacity	61.72 kW
Humidifier	Pan type 32 kg/h (10 kW × 2 STEP)	
	Volume	1 SET

Passive design으로 모델링하였는데 이를 위해서 기존 외벽 열관류율인 0.37 W/m²K을 0.136 W/m²K로 지붕 열관류율 0.35 W/m²K을 0.141 W/m²K로 설정하였다.

2.3.2 신재생에너지 system 모델링

① 태양광 발전(Photovoltaic, PV)

태양광 발전은 태양의 빛 에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 발전기술이다. Energy Plus V8.0 태양광발전 입력방식 중 실험에서 얻어진 경험적 계수를 사용하는 Sandia Model 방식을 적용하였다. 경사각별 발전성능을 실제로 측정하고 해석한 결과 경사각 30도를 기준으로 정남향에 설치된 PV모듈의 발전량이 가장 양호하여⁽⁷⁾, 본 연구에서는 지붕에 경사각 30도로 PV 시스템을 설치한 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 4와 같이 태양광 전지판은 단결정 실리콘(Mono Crystalline Silicon) 재질로 하였으며, 태양광 전지판의 입력조건에는 미국 BP Alternative Energy 사의 BP 275 모델을 적용하였다. 한 패널의 크기는 0.63 m²이며 패널 당 최대 출력은 75.65 W, 태양광 발전효율 12%, 인버터 전환효율을 1로 설정하였고 총 22개의 태양광 전지판을 설치하도록 하였다.⁽⁸⁾

② 태양열-지열히트펌프 하이브리드 시스템(Solar Geothermal Heat Pump Hybrid System, SGHS)

본 연구는 BSL의 냉, 난방에너지 소비량을 절약하기 위해 태양열-지열을 이용한 지중 열교환기와 지열히트펌프를 설정하였다. Table 3과 같이 열교환기 종류는 수직 밀폐형이며, 천공 깊이는 150 m, 총 4개를 설치하는 것으로 하였다. 수직 밀폐형 지중열교환기를 연결되는 물대물 히트 펌프(Water to water heat pump)에 대한 입력 값은 Table 4와 같으며 냉방 설계용량은 19.5 Kw COP는 4.6, 난방 설계용량은 20.3 Kw, COP는 4.0로 설정하였다.⁽⁹⁾

Table 3 Vertical closed geothermal heat exchanger input data

Bore hole depth(m) × Number	150 × 4
Bore hole gap(m)	5
Diameter(mm)	150
Length(m)	600
Heat exchanger system	Vertical closed single U
Pipe size	HDPE, 32A, SDR-11

Table 4 Input data of geothermal heat pump

	Cooling	Heating
Capacity(kW)	19.5	20.3
COP	4.6	4.0
Flow rate(l/min)	32.3	45.2
Power(kW)	4.28	5.07
Cycle Time(h)	0.1	0.1

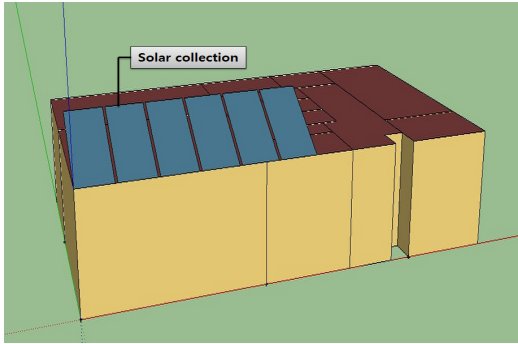


Fig. 4 Solar collectors installation exterior.

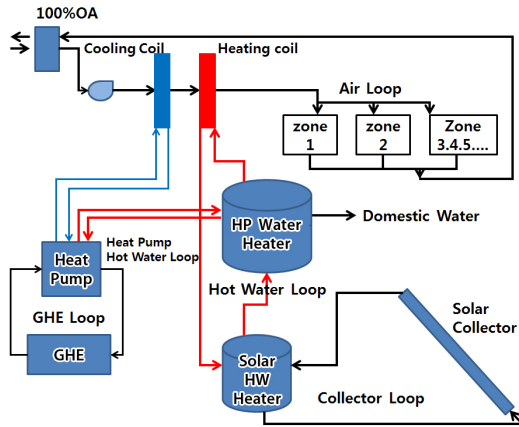


Fig. 5 Solar-Geothermal Heat Pump Hybrid System (SGHS) diagram.

Fig. 4는 태양열 집열기 설치외관으로 남향 30도 각도로 1.2 m×2.45 m인 태양열 집열기(Alternate Energy Technologies AE-32형)를 설치한 경우를 설정하여 태양열을 집열장치, 축열 장치로 통해 집열하고 지열 히트펌프 생산되는 냉, 온수를 혼합하여 냉, 난방 및 급탕용 온수를 생산하도록 하였다.

본 연구에서 적용되는 태양열-지열히트펌프 하이브리드 시스템의 계통도는 Fig. 5와 같다.

2.4 시뮬레이션 해석 결과

2012년도에 개정된 질병관리본부의 BSL 검증기술서에 따르면 생물안전 연구시설 내 밀폐구역 청정도를 위해 환기 회수를 최소 10회 이상 유지하도록 권고하고 있다. 본 해석 대상 시설의 실험실내(BSL3-1)의 풍량은 700 m³/h, 체적은 54.54 m³로 실제 측정 환기회수는 12.83회로 일반 건물의 환기회수인 2.5회와 비교하였을 때 약 5배 정도의 높은 환기회수에 해당된다. 이에 따라 시뮬레이션 해석 결과, BSL의 공조시스템 특성 상 전체 공조부하 중 외기부하가 차지하는 비율이

Table 5 Simulation case

Case 1	Basic system
Case 2	Basic system + Passive design with exterior envelopes(Super insulation)
Case 3	Basic system + PV
Case 4	Basic system + SGHS
Case 5	Basic system + Passive design with exterior envelopes + PV + SGHS

해석 결과 43.2%로 가장 높으며, 이는 실험실의 급기와 배기에 필요한 환기로 인한 에너지 소비량이 44%에 달한다는 미국 NIH에서 제시한 실험값과 유사한 결과를 보여주고 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 Energy Plus V8.0 시뮬레이션을 통해 Table 5와 같이 5가지 Case에 따라 BSL의 연중 가동에 따른 에너지 소비량을 분석하였다. Case 1은 앞서 시뮬레이션 모델링 부분에 설명했던 Basic system으로서, 실제 생물안전 밀폐시설을 이용하였으며, 부하 및 실내조건에 영향을 미치는 열 환경은 초기 설계 값을 유지하는 것으로 하였다.

Case 2는 Basic system에 외피를 슈퍼단열로 패시브 요소를 적용하였을 경우이며, Case 3은 태양광발전시스템(PV)을 적용한 경우이다. Case 4는 태양열-지열하이브리드 시스템을 설치하였을 경우이고, Case 5는 외피를 슈퍼단열로 패시브 요소를 적용하고 태양광발전, 태양열, 지열시스템 기술을 모두 적용하였을 때 각 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 6~Fig. 10에서 각 경우 연간에너지 소비량에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 6는 Basic system의 연간에너지 소비량을 나타내고 있다. 생물안전 밀폐시설의 특성상 실내를 22℃로 유지하며, 연중 24시간 가동하는 공조시스템이므로 냉방에 필요한 에너지 보다 난방에 필요한 에너지가 크며 대상지역의 6, 7월이 장마철이기 때문에 일사량의 감소로 태양광 발전량이 감소하여 에너지 소비량이 증가함을 알 수 있었다.

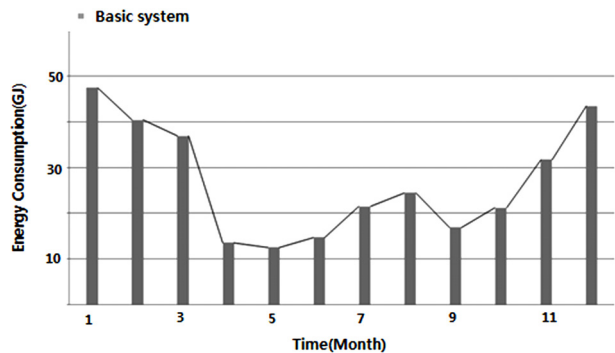


Fig. 6 Simulation results of energy consumption(Case 1).

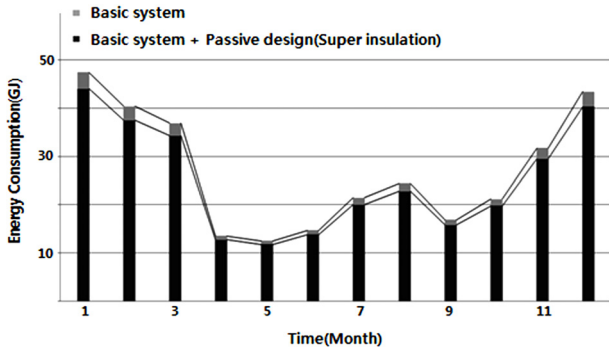


Fig. 7 Simulation results of energy consumption(Case 2).

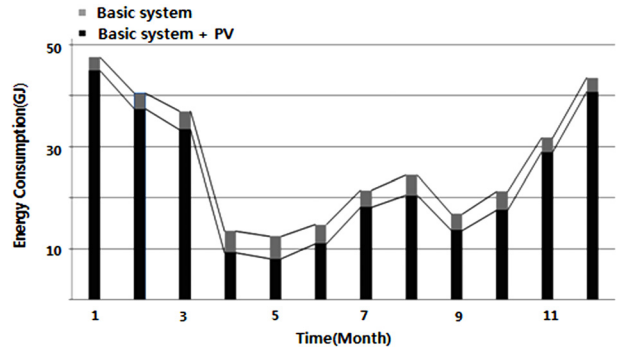


Fig. 8 Simulation results of energy consumption(Case 3).

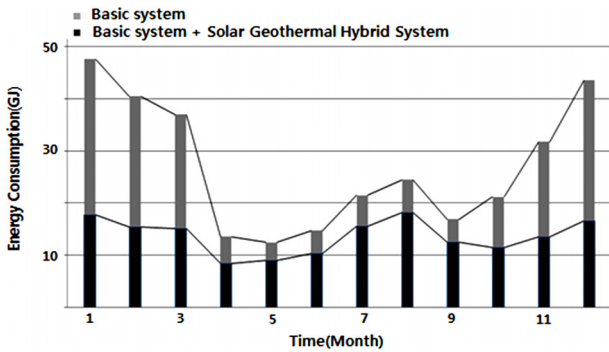


Fig. 9 Simulation results of energy consumption(Case 4).

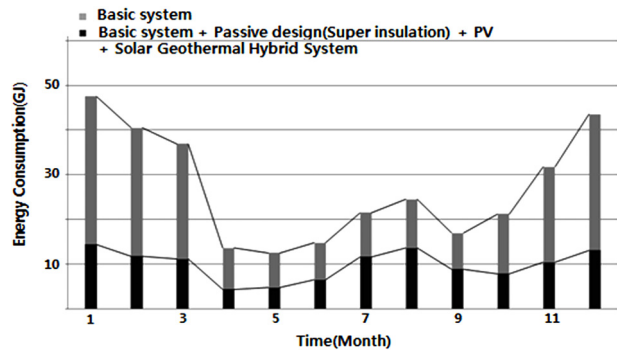


Fig. 10 Simulation results of energy consumption(Case 5).

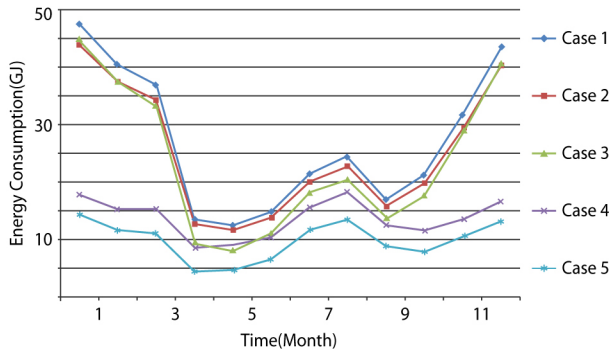


Fig. 11 Monthly total energy consumption.

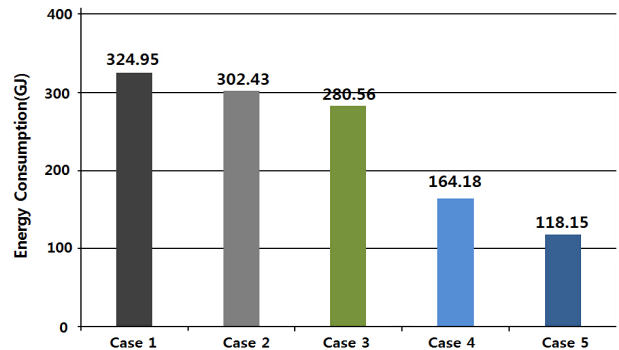


Fig. 12 Annual total energy consumption.

Fig. 7과 Fig. 8을 Basic system의 결과인 Fig. 6과 비교해보면 BSL의 경우 외부창이 없기 때문에 단열조건을 강화해도 에너지 소비량 감소가 6.9% 정도로 그리 크게 감소하지 않음을 알 수 있다. 또한, Fig. 8에서 나타난 바와 같이 태양광발전시스템(PV)을 지붕에 적용한 Case 3의 경우 에너지 소비 감소가 약 13.7% 정도로 Case 2의 경우에 비해 에너지 소비량의 감소폭은 증가하고 있으나 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 9에서와 같이 태양열-지열히트펌프 하이브리드 시스템(SGHS)을 설치한 Case 4, 8월의 경우 최고 18.16 GJ, 4월에 최저 8.49 GJ의 에너지를 소비하고 있으며, 1월

에 최대 62.5%로 크게 에너지 소비가 감소하고 있는데 이는 겨울철 난방에 필요한 전력이 태양열-지열히트펌프 적용으로 인해 감소되었기 때문으로 생각된다. 또한, 단열조건을 강화한 외피에 Passive design(Super insulation)과 PV 및 SGHS를 모두 적용한 경우 하계의 경우 1월에 최고 14.4 GJ, 4월에 최저 4.34 GJ의 에너지를 소모하며 2월에 최대 71%까지 크게 에너지 소비를 절감할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 각 Case에 대해서 월별 에너지 소비량의 변화추이를 나타내고 있으며, Fig. 12는 각 경우 연간 총에너지 소비량을 나타내고 있다.

Fig. 11에서 월별 에너지 사용량은 유사한 패턴을 보이고 있으나 동계 태양열-지열히트펌프 하이브리드 시스템(SGHS)을 설치한 경우 에너지 사용량이 상당히 감소함을 알 수 있다. 또한, Fig. 12에서 보는 바와 같이 Case 1(Basic system)인 경우 연간 총에너지소비량은 324.95 GJ, Case 2(Basic system + 외피 Passive design-Super insulation)는 302.43 GJ이며, Case 3(Basic system + PV)는 280.56 GJ이다. 또한 Case 4(Basic system + SGHS)인 경우는 164.18 GJ, Case 5(Basic system + 외피 Passive design-Super insulation + PV + SGHS) 적용 시에는 118.15 GJ의 연간 총에너지를 사용하고 있음을 알 수 있었다.

이는 Basic system의 연간 총에너지 소비량에 대비할 경우 Case 2의 경우 6.9% 에너지 절감효과를 보였으며, Case 3의 경우 13.7%, Case 4의 경우 49.5%, Case 5의 경우 연간 63.6%의 에너지를 절감할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

BSL은 실험실 내부의 오염을 방지하기 위해 공조시스템이 24시간 연중 가동되며 전외기 급기 및 전배기를 해야 하는 특수 음압시설로서 동일규모 일반사무소 건물에 비해 에너지소비량이 많은 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 에너지 다소비 시설인 BSL을 대상으로 Energy Plus V8.0 시뮬레이션을 통해 5가지 Case에 대해 BSL의 연중 가동에 따른 에너지 소비량을 분석하였다.

- 1) Basic system은 연간 에너지를 324.95GJ 사용하고 있으며, Basic system에 슈퍼 단열재, PV 및 SGHS를 각각 적용하였을 경우 에너지 소비량이 감소됨을 확인할 수 있었다.
- 2) 외피에 Passive design 요소인 슈퍼 단열재를 적용할 경우 Basic system에 비교하여 연간 평균 6.9% 에너지를 절감시킬 수 있었으며, PV인 경우 연간 평균 13.7%, SGHS인 경우 연간 평균 약 49.5%의 에너지 사용량의 절감이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 슈퍼 단열재, PV, SGHS를 모두 적용할 경우 기존의 Basic system에서의 에너지 소모량에 비해 연간 평균 63.6%의 절감효과를 얻을 수 있었다.
- 4) 그러나 다양한 신재생에너지를 적용하여 동일규모 일반사무소 건물에 비해 5배 이상의 막대한 에너지를 소비하고 있는 BSL의 실제적인 에너지 절감과 에너지시스템의 개선에 활용될 것으로 판단된다. 이와 함께 BSL에서 신재생 에너지시스템 설치 시 초기 건설비 대비 투자 회수비용과 경제성분석이 추후 연

구되어야 할 것으로 판단된다.

References

1. Kim, C. N. and Lee, S. J., 2012, A study on the reduction performance evaluation of building energy demand for zero energy apartment building, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 2, pp. 319-324.
2. Jang, H. I., Cho, Y. H., and Jo, J. H., 2013, Application and improvement of the renewable energy management system in existing buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 29, No. 2, pp. 227-234.
3. CDC, 2008, Genetically modified organism development and experimental guidelines in research facility, MW.
4. Park, H. J. and Hong, J. K., 2013, An analytical study on the prediction of indoor air quality and the reduction of air conditioning load in Bio Safety Level 3 Laboratory, Korean Journal of Air-Conditioning Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 11, pp. 813-822.
5. Taylor, R. D., Pedersen, C. O., Fisher, D., Liesen, R. and Lawrie, L., 1990, Simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs, Proceedings, the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings, Liege, Belgium.
6. Goun, Y. C., 2010, High-performance technique of building outer cover, Journal of the KIAEBS, Vol. 4, No. 4, pp. 17-23.
7. Song, J. H., Yoon, J. H., An, Y. S., Kim, S. G., Lee, S. J., and Chung, Y. K., 2008, Power performance characteristics of transparent thin-film BIPV module depending on an installation angle, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 58-63.
8. Davis, M. W., Fanney, A. H., and Dougherty, B. P., 2002, Measured versus predicted performance of building integrated Photovoltaics, Proceedings, ASME Solar 2002 : International Solar Energy Conference, Reno, Nevada, U.S.A.
9. Seem, J. E., 1987, Modeling of heat transfer in buildings, Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison, WI.
10. Laboratories for the 21 Century, 2005, U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program and U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C, U.S.A.