



[2017-9-ST-004]

태양열 흡수식냉방과 태양광 터보냉방의 성능비교

김종규^{1)*} · 이상남¹⁾ · 박동용¹⁾ · 김하늘²⁾

Performance Comparison of Solar Thermal Absorption Cooling and Photovoltaic Turbo Cooling

Jongkyu Kim^{1)*} · Sangnam Lee²⁾ · Dongyong Park³⁾ · Haneol Kim⁴⁾

Received 21 August 2017 Revised 18 September 2017 Accepted 18 September 2017

ABSTRACT This paper compares the solar thermal absorption cooling and photovoltaic (PV) turbo cooling performance in Riyadh, Saudi Arabia using a System Advisor Model (SAM) program provided by NREL (National Renewable Energy Laboratory). The cooling capacity of the two cooling systems was set to 100 usRT under the irradiation condition at 12 PM in March. The PV cooling capacity was maximum 100 usRT in June and September, but it decreased to 80 usRT in December because of the lower irradiation. In the case of solar thermal absorption cooling, the performance was greater than 100 usRT in June and September but the performance was lower than PV cooling in December. The annual deviation of the cooling performance of the solar thermal cooling is larger than that of PV cooling. This is probably due to the large change in the optical efficiency of the solar thermal system. Therefore, it is necessary to optimize the installation capacity of the solar thermal cooling system.

Key words Solar thermal(태양열), Photovoltaic(태양광), Cooling(냉방), Linear Fresnel Reflector(선형 프레넬 반사경), Performance(성능), Absorption(흡수식)

Nomenclature

 C : Cooling capacity, usRT $Q_{optical}$: Thermal energy from reflector, W $Q_{absorber}$: Thermal energy absorbed, W A : Area, m² I_{normal} : Direct Normal Irradiation, W/m² I_{POA} : Plane of Area Irradiation, W/m² $\eta_{optical}$: Optical efficiency $\eta_{absorber}$: Absorber efficiency $\eta_{reflector}$: Reflector efficiency η_{module} : Module efficiency η_T : PV temperature loss efficiency η_{soil} : PV soiling loss

subscript

LFR : Linear Fresnel Reflector

PV : Photovoltaic

1) Korea Institute of Energy Research

2) Inha University

*Corresponding author: mnokim@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3477

Fax: +82-42-860-3637

1. 서론

파리 기후 협정 및 기후변화로 인해 신재생에너지가 전 세계적으로 더욱더 많은 조명을 받고 있다. 그중 태양광 산업은 중국의 참여로 원가절감 및 경제성이 확보되면서 가장 각광받는 신재생에너지원이 되었으며^[1], 태양열발전 산업 또한 미국, 중동, 북아프리카, 남미, 중국 등에서 시장 개발이 확대 중에 있어 경제성 확보가 예상된다.^[2] 이 두 시스템은 앞으로 화력발전과 비교될 수 있을 만큼 잠재가치가 큰 산업으로 고 일사 지역에서 많은 관심을 받고 있다. 대부분의 고일사 지역은 고온 건조한 기후로 인해 냉방에 의한 에너지 수요가 큰 비중을 차지한다. 중동지역 중 사우디아라비아에서는 전체 에너지 소비량 중 약 50%가 냉방에 사용된다.^[3] 이 때문에 해당지역의 인구증가 및 에너지 소비형태로 보아서 태양에너지를 이용한 냉방기술의 수요가 증가할 것으로 예상된다. 중동지역에서 빌딩과 같은 일정 규모 이상의 냉각시스템이 공급되는 경우 주로 중앙 공조 냉방시스템이 사용된다. 중앙 공조는 대용량의 냉방시스템으로 이에 적합한 냉동기는 터보 압축식과 흡수식이다. 터보 압축식 냉방은 전기에너지를 이용하는 시스템으로 태양광 발전과 함께 사용될 수 있으며 흡수식 냉동기는 열을 이용하는 냉방기술로 태양열과 함께 사용될 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 중동과 같은 고 일사 지역에서 태양에너지를 이용한 터보 압축식 냉방과 흡수식 냉방의 시스템의 성능을 비교하고자 한다. 태양열을 이용한 기술은 집광 방식에 따라 구유형, 접시형, 타워형, 선형 프레넬 형 등으로 나뉘나 이 중 흡수식 냉방에 가장 적합한 집광 방식으로 200°C 영역의 중온에 적합한 선형 프레넬 반사(Linear Fresnel Reflector)이다.^[4] 두 냉방 시스템을 비교하기 위하여 동일한 냉방용량을 기준을 선정했으며 시중에서 판매되고 있는 터보냉동기의 최소 냉방용량인 100 usRT로 선정했다. 두 시스템 평가는 사우디아라비아 리야드의 기후자료를 사용해 진행했으며 분석 결과는 3월, 6월, 9월, 12월 각각의 월평균으로 나타내었다. NREL에서 제공하는 SAM을 계산 프로그램으로 사용하였으며 태양광 시스템은 전력생산량을, 태양열 시스템은 증기생산량을 결과로 얻을 수 있다. 이들 값을 이용한 냉방성능은 냉방시스템의 전력변환비(태양광)와 증기변환비(태양열)를 사용하여 각각 계산

하였다.

본 연구를 위하여 사우디아라비아에서 태양광 시스템과 태양열발전 시스템의 전력생산 성능 및 경제성을 비교한 연구를 사전에 수행하였다.^[5]

1.1 태양광 터보냉방

태양광 터보 냉방은 Fig. 1과 같이 모듈에서 생산된 전기 에너지를 인버터(Inverter)를 거쳐 터보냉동기를 구동하는 시스템이다.

전력공급의 수단이 태양광 모듈로 대체된 것이 기존의 전력망 시스템과의 차이점이다. 터보냉동기는 증기 원심압축기를 사용하여 높은 효율(COP 5 이상)로 대용량의 냉매를 압축할 수 있기 때문에 중앙 공조용으로 널리 사용된다.^[6]

1.2 태양열 흡수식 냉방

태양열 흡수식 냉방시스템은 Fig. 2와 같이 LFR을 통해 증기를 생산한 후 생산된 증기를 흡수식냉동기에 공급함으로써 냉방시스템을 구동한다.

흡수식 냉동기는 주로 중앙 공조용으로 사용되며 재생기 사용온도에 따라 1중효용, 2중효용 등으로 나뉜다. 본 연구에서는 선형 프레넬 집열기에서 증기를 공급할 수 있기 때문에 냉방성능이 높은 2중효용 흡수식 냉동기를 사용하였다.^[7] 선형 프레넬 집열기인 LFR은 폭이 좁고 긴 반사거울

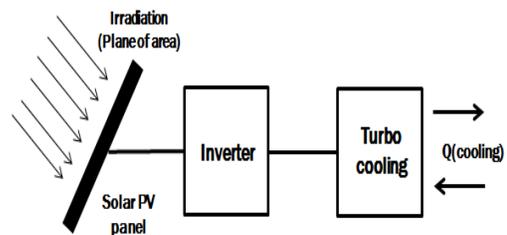


Fig. 1. Schematic of PV turbo compression cooling system

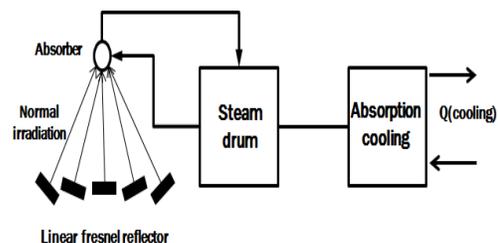


Fig. 2. Schematic of solar thermal absorption cooling system

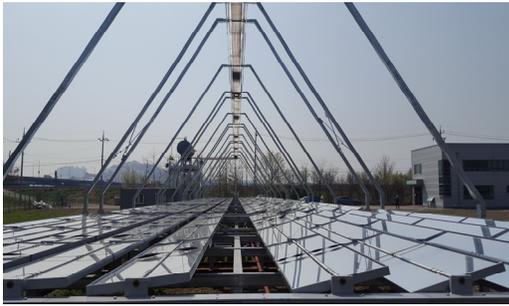


Fig. 3. LFR concentration system

이 태양을 1축으로 추적, 태양광을 반사하여 선(Line)집광으로 열에너지를 얻을 수 있는 태양열 집열기 이다. LFR의 집광면에 배관을 설치해 물을 공급하면 최대 400°C 까지의 증기를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 냉방이나 발전에 사용할 수 있다. Fig. 3은 실제 개발되어 국내에 설치된 LFR 집열기 이다.

2. 냉방시스템 설계

2.1 태양광 터보 냉방시스템 및 성능분석

2.1.1 태양광 터보 냉방시스템

태양광 터보 냉방시스템은 크게 태양광 모듈과 터보냉동기로 구성된다. 우선 태양광 제품 선정 시 고려되는 인자는 제조사, 제품 효율, 인버터 세 가지이다. 제조사는 세 개 회사를 선정했으며 선정 기준은 서로 다른 제조국가 및 제품 효율로 H사, C사, S사를 선정하였다. 제품 효율은 모듈의 전력변환 효율 및 온도 상승에 따른 효율 감소를 고려해 계

Table 1. PV module specification

PV Module			
Model	Nominal Efficiency (%)	Temperature Coefficient (%/C)	Module Area (m ²)
S사	18.41	-0.39	1.63
H사	15.34	-0.41	1.96
C사	15.94	-0.43	1.94
Inverter			
Model	Efficiency(%)		
H사	96.40		

Table 2. Turbo cooler specification

Turbo cooling model			
Model	COP	Cooling capacity	Power consumption
L사	6.40	100 usRT	54.94 kW

산되며 Table 1과 같이 세 제품 모두 서로 다른 효율특성을 보인다. 인버터의 경우 사우디아라비아의 전력공급 특성을 고려하여 220V에 맞추어 선정했으며 교류/직류(AC/DC)의 비율을 1.1로 설정해 인버터의 설치대수를 계산하였다.

터보냉동기 선정은 국내에서 판매되고 있는 터보 냉동기 중 COP(냉동성능계수)가 가장 높은 L사의 제품^[8]으로 선정했으며 냉동기 용량은 가장 낮은 용량으로 판매되는 100 usRT로 선정했다. 각 제품의 세부사항은 Table 2에 나타내었다.

2.1.2 태양광 터보냉방 성능 분석방법

태양광 터보 냉방 분석은 Fig. 4와 같이 순차적으로 계산된다. 우선 설계용량은 PV 출력량으로 3월 12시 평균 일사량 기준 100 usRT 냉방에 필요한 소비전력이다. 선정된 터보 냉동기의 소비전력은 54.94kW로서 이를 충족시키기 위한 설계용량은 시스템 효율 감소를 고려하여 약 85kW로 선정하였다. 선정된 설계용량에 따라 SAM 프로그램에서 매시간 출력이 계산된다. 이때 출력 계산에 필요한 인자는 시간별 일사량, 시간별 외기 온도, 풍속, 기타 효율 저해 요인 등이다.

출력량(kW)은 월별 시간 평균 단위로 계산되며 계산된 출력량은 선정된 터보냉동기의 사양에 따라 냉방성능(usRT)을 산출하는데 사용된다. 냉방성능 계산은 100 usRT 터보 냉동기의 냉방용량과 54.94kW 소비 전력의 비인 전력변환계수 1.82 usRT/kW를 상수 값으로 이용하였다.



Fig. 4. PV cooling model analysis process

2.2 태양열 흡수식 냉방시스템 및 성능분석

2.2.1 태양열 흡수식 냉방 조건선정

태양열 흡수식 냉방 시스템은 집열기와 흡수식냉동기, 기수분리기 등으로 구성된다. 집열기 조건은 순환비, 출구 온도, 압력, 설치면적 등이 있다. 순환비는 흡수기에서 순환하는 유량과 증기의 비이며, 본 연구에서는 순환비를 10으로 선정하였다. 출구 온도 및 압력 조건은 흡수식 냉동기의 사용 증기압을 통해 결정되며 가장 많이 사용되는 증기압 9 bar로 선정하였다. 이때 포화온도인 175°C를 LFR 출구 온도로 결정하였다. 설치면적은 3월 12시 기준 약 100 usRT 생산을 기준으로 설정하였다. 흡수식냉동기 선정은 국내에서 판매되고 있는 제품 중 COP가 가장 높은 L사의 제품^[9]으로 선정했으며 냉방용량은 터보 냉동기와 같은 100 usRT로 선정했다. LFR 설계조건 및 흡수식 냉동기의 세부 사항은 각각 Table 3과 4에 나타내었다.

2.2.2 태양열 흡수식냉방 분석방법

LFR 흡수식 냉방 분석은 Fig. 5와 같이 순차적으로 계산된다. 첫 과정의 설계면적은 100 usRT 냉방을 위해 필요한 LFR 설치면적(m²)이다. 100 usRT 냉방을 위해 필요한



Fig. 5. solar thermal cooling model analysis model

Table 3. Design condition of LFR

LFR inlet temperature	LFR outlet temperature	Pressure	Area
172°C	175°C (sat. steam)	9 bar	515 m ²

Table 4. Absorption cooling model

Absorption cooling model			
Model	COP	Cooling capacity	Steam consumption
L사	1,51	100 usRT	350 kg/h

증기량은 350kg/h이며 이때 필요한 LFR 반사면적은 515m²이다.

선정된 설계면적에 따라 SAM 프로그램에서 월평균 시간당 증기량이 계산된다. 이때 증기량 계산에 필요한 인자는 직달일사량, 광학 효율, 흡수기 효율 등이 있다. 냉방용량은 선정된 흡수식냉동기의 냉방용량과 증기생산량의 비인 증기변환계수 0.286 usRT/(kg/h)를 이용하여 계산하였다.

3. 성능계산 결과

3.1 태양광 냉방 계산결과

터보냉방성능은 PV에 도달되는 일사량에 따라 결정된다. PV에 도달되는 일사량은 직달 일사량, 산란 일사량, 외부에서 반사되어 입사되는 량, 세 가지를 종합하여 계산된다. 위의 일사량들의 합을 POA라 하며^[10], 사우디아라비아 리야드에서의 분기별 값을 Fig. 6에 나타내었다. POA는 6월과 9월에 최대 약 1,000W/m²로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 냉방용량은 인버터 효율($\eta_{inverter}$), 모듈 효율(η_{module}), 먼지부착 효율($\eta_{soiling}$), 전력변환 계수를 고려하여 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 인버터 효율은 Table 1에서 선정된 제품의 효율인 96.40%이며 먼지부착 효율은 리야드에서 셀 표면 위 먼지 부착으로 발생되는 10% 효율 감소를 고려하여 90%로 설정하였다.^[11] 모듈 효율은 Table 1의 각 제품별 온도에 따른 손실이 고려돼 계산되며 이때의 H사 제품에서 외기온도, 셀온도 및 모듈 효율의 관계는 Fig. 7에 나타내었다. Solar-to-cooling 비율은 총 입사된 일사량과 냉방용량의 비이며 식 (2)를 통해 계산된

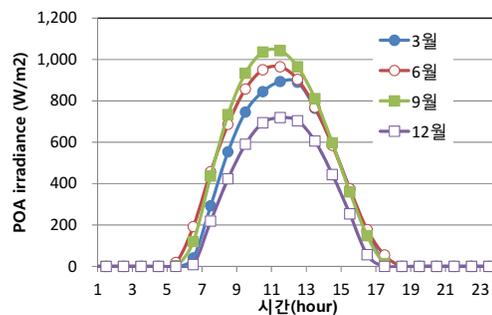


Fig. 6. Monthly average of POA irradiance

다. 이는 Table 6에 제품 별로 비교하였다.

$$C_{PV} = I_{POA} \times A_{PV} \times \eta_{inverter} \times \eta_{module} \times \eta_{soil} \times 1.82 \quad (1)$$

$$Solar-to-cooling\ ratio_{PV} = \frac{C_{PV}}{I_{POA} \times A_{PV}} \quad (2)$$

월평균 냉방성능을 Fig. 8에 나타내었다. 일사량이 높은 6월과 9월에 최대 약 100 usRT의 냉방성능이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 12월의 경우 낮은 일사량으로 인해 냉방성능이 80 usRT까지 감소하는 것을 확인할 수 있다.

6월의 일사량이 12월에 비해 최대 400W/m² 정도 약 43%가 증가함에도(Fig. 6 참조) 냉방성능은 25% 증가되어 100 usRT에 이르게 된다(Fig. 7 참조). 이는 6월의 셀 온도가 약 70°C인데 반하여 12월의 경우 최대 40°C 정도로 약 30°C가량 낮음으로 인하여 일사량 감소대비 성능감소가 크지 않게 나타났다.

동일한 출력을 생산하기 위한 태양광 설치면적은 제품의 효율에 따라 차이를 보인다. 세 제품 중 효율 값이 가장 높은 S사 제품이 461.6m²로 가장 작은 설치면적이 필요하며,

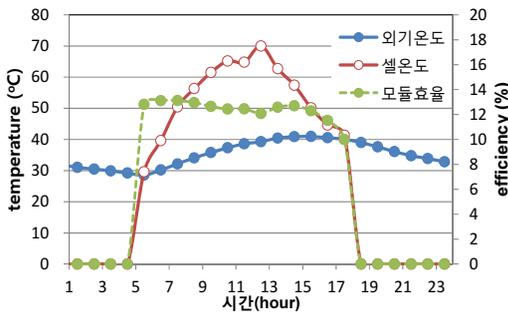


Fig. 7. Monthly average of ambient and cell temperature and module efficiency (H corp.)

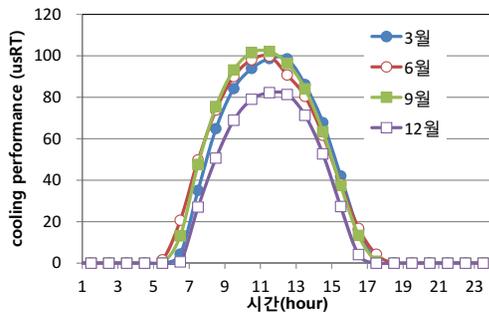


Fig. 8. Monthly average of cooling performance (H corp.)

H사와 C사의 제품은 효율이 비슷하여 약 550m²의 설치면적이 필요하다. 각 제품별 설치면적의 차이는 Table 5를 통해 확인할 수 있다.

3.2 태양열 냉방 계산결과

태양열 흡수식냉방은 직달일사량만을 이용하기 때문에 사용할 수 있는 에너지는 태양광 보다 작다. Fig. 9는 분기별 사우디아라비아 리야드에서의 직달일사량을 나타내는 그래프이다. 직달일사량은 6월과 9월 최대치가 약 900W/m²로 POA보다 약 100W/m² 작게 나타난다. 태양열 시스템의 냉방성능은 식 (3)과 (4)를 통해 계산된 흡수 열량에 따른 증기생산량으로 계산된다. 이때 광학효율($\eta_{optical}$)은 태양의 위치변화에 따른 반사경의 반사각, 그림자(shadowing) 및

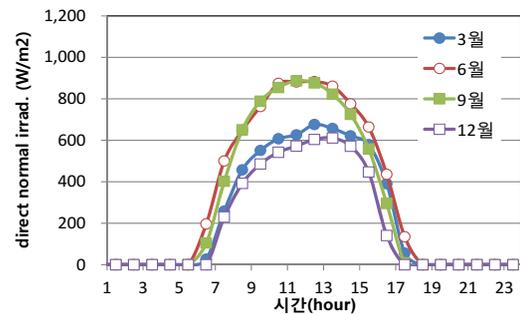


Fig. 9. Monthly average of direct normal irradiation

Table 5. PV module total area

S사	H사	C사
461.6 m ²	553.5 m ²	548.2 m ²

Table 6. Cooling performance and solar-to-cooling ratio

Cooling performance (usRT)			
월/시간	S사	H사	C사
3월/12시	96.1	97.4	96.3
6월/12시	90.0	89.7	86.4
9월/12시	96.1	95.3	92.0
12월/12시	78.0	80.4	79.7
Solar to cooling ratio			
월/시간	S사	H사	C사
3월/12시	0.82	0.70	0.70
6월/12시	0.76	0.63	0.61
9월/12시	0.76	0.63	0.61
12월/12시	0.84	0.73	0.73

간섭(blocking) 등에 의해 결정되고 흡수기 효율($\eta_{absorber}$)은 외기온도 및 풍속을 기반으로 계산된 열손실량을 통해 결정된다. 이 때문에 LFR 효율은 시간에 따라 변하게 되며 이는 Fig. 10을 통해 나타내었다.

$$Q_{optical} = I_{normal} \times A_{LFR} \times \eta_{optical} \quad (3)$$

$$Q_{absorb} = Q_{optical} \times \eta_{absorber} \quad (4)$$

$$C_{LFR} = \dot{m}_{steam} \times 0.2857 \quad (5)$$

$$Solar\ to\ cooling\ ratio_{LFR} = \frac{C_{LFR}}{I_{Normal} \times A_{LFR}} \quad (6)$$

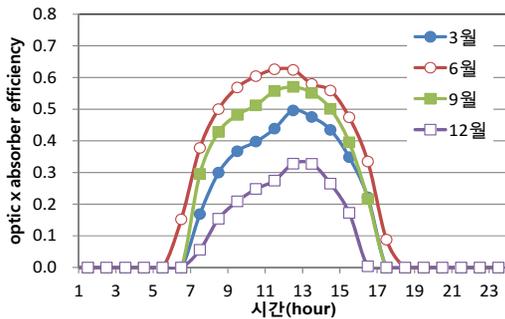


Fig. 10. Monthly average of LFR efficiency

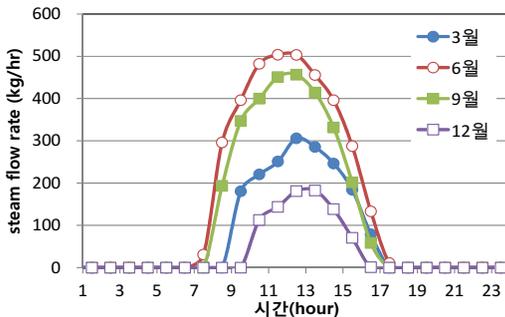


Fig. 11. Monthly average of steam flow rate

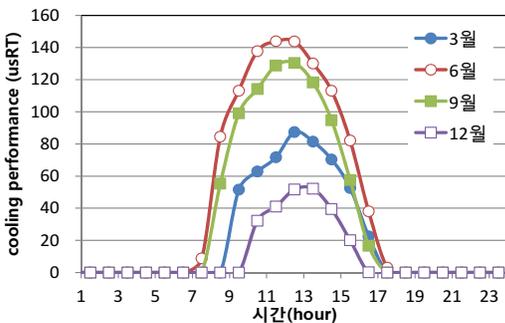


Fig. 12. Monthly average of cooling performance

태양열 냉방시스템의 증기생산량 및 냉방성능을 Fig. 11, 12에 나타냈으며 12시 기준 3, 6, 9 및 12월의 냉방성능과 solar to cooling 비율을 Table 8에 정리하였다. Table 8에서 6월과 9월에 solar to cooling 비율이 1 이상이며 12월에는 0.59 까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 6, 9월의 경우 일사량 대비 냉방성능이 크고 3, 12월의 경우 일사량 대비 냉방성능이 떨어짐을 알 수 있다. 태양광과 달리 태양열의 solar to cooling 비가 연간 크게 변하는 것으로 나타나는데, 이는 연간 태양의 위치에 따른 반사각의 변화 등 광학효율에 미치는 영향 큰데 반하여 태양광의 경우 연간 외기 온도변화에 따른 태양광 효율에 미치는 영향은 상대적으로 크지 않기 때문에 판단된다.

냉방성능을 보면 6, 9월에 기준 냉방용량을 초과하지만 3, 12월에는 냉방용량을 충족시키지 못하고 있다.

3.3 성능결과 비교

태양광과 태양열 냉방 시스템의 성능을 Table 9와 같이 solar to cooling 비율로 나타내었다. 태양열 냉방이 태양광 냉방보다 태양에너지를 이용하여 냉방에 활용하는 측면에서는 효과적으로 나타났다. 그러나 태양광은 일사량으로

Table 7. Steam mass flow rate

구분	3월 기준 설계조건(kg/h)
	증기량
3월/12시	305.9
6월/12시	503.2
9월/12시	456.3
12월/12시	180.8

Table 8. Cooling performance and solar-to-cooling ratio

Cooling performance (usRT)	
3월/12시	87.4
6월/12시	143.8
9월/12시	130.4
12월/12시	51.7
Solar to cooling ratio	
3월/12시	0.89
6월/12시	1.12
9월/12시	1.02
12월/12시	0.59

Table 9. Yearly average of solar to cooling

Solar to cooling		
태양광 냉방	S사	0.8
	H사	0.68
	C사	0.67
태양열 냉방		0.83

POA를 사용하고 태양열은 직달일사량을 사용하는 차이가 있음을 고려할 필요가 있다.

Fig. 8의 태양광 냉방성능 그래프와 Fig. 12의 태양열 냉방성능 그래프를 비교하면 태양열 냉방시스템의 경우 연간 냉방성능 변화가 태양광 시스템에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 일사량 변화에 따른 태양열의 광학효율 변화가 크기 때문으로 사료되며 따라서 태양열 냉방시스템의 경우 백업시스템 등의 운영하는 조건으로 설치용량의 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광 냉방시스템과 태양열 냉방시스템의 성능을 비교분석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 태양광 냉방에 사용되는 일사량(POA)은 2,332kWh/m², 태양열 냉방에 사용되는 직달 일사량은 2,267kWh/m²로 PV 터보냉방이 약 3% 더 높다. 하지만 연간 총 냉방용량은 PV 터보냉방의 경우 1,587kWh/m²이며 LFR 흡수냉방은 1,883kWh/m²로 LFR 흡수식냉방이 약 16 % 높게 계산됐다.
- 태양열 냉방은 연평균 solar to cooling 비율이 0.83이며 태양광 냉방은 0.7로 나타났다. 하지만 태양열 냉방은 월별대비 냉방성능의 편차가 크기 때문에 일사량이 좋은 6월과 9월에는 설계에 사용된 흡수식 냉동기의 100 usRT 냉방용량을 초과하게 된다. 이 때문에 태양열 냉방은 일사량에 따른 설계기준에 유의해야한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 국제공동연구사업(20148510011190)을 재원으로 수행한 과제의 결과입니다.

References

- [1] Ping Huang, Simona O. Negro, 2016, How China became a leader in solar PV: An innovation system analysis, Renewable and suitable Energy Reviews, Vol.64, pp. 777-789.
- [2] Zhifeng Wang, 2010, Prospectives for China's solar thermal power technology development, Energy, Vol.35, pp. 4417-4420.
- [3] Ibrahim I. EI-Sharkawy, Hossam Abdel Meguid, 2014, Potential application of solar powered adsorption cooling systems in the Middle East, Applied Energy, Vol.126, pp. 235-245.
- [4] H.L. Zhang, J. Baeyens, 2013, Concentrated solar power plants: Review and design methodology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.22, pp. 466-481.
- [5] 이현규, 2003, 터보냉동기의 특징 및 관련기술, 한국유체기계학회 논문집, Vol.6, No.4, pp. 86-93.
- [6] 김광제, 1993, 흡수식 냉동기의 원리, 응용 및 그 운용법, 설비저널, Vol.22, No.1, pp. 17-27.
- [7] 무급용 인버터 터보 냉동기, 2015, LG 전자, B2B, <http://kr.lgeaircon.com/gcac.common.search.RetrieveSearchPopup.dev?articleNo=10003346&menuName1=menu.M05&menuName2=menu.M050202#>.
- [8] 스팀형 2중 효율 냉동기, 2015, LG 전자 B2B, <http://kr.lgeaircon.com/gcac.common.search.RetrieveSearchPopup.dev?articleNo=10003439&menuName1=menu.M05&menuName2=menu.M050202>.
- [9] P.Gilman, 2015, SAM Photovoltaic model Technical Reference, National Renewable Energy Laboratory.
- [10] Fred Chen, 2014, Tokyo Electron, PV Soiling Loss in the Middle East Region.
- [11] Jim Hinkley et al., 2011, Concentrating solar power - drivers and opportunities for cost-competitive electricity, CSIRO.