

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 2, 2003

Prismatic Solar Hybrid Collector 시스템의 에너지 성능 평가에 관한 연구

Energy Performance Assessment Study of Prismatic Solar Hybrid Collector System

박준언*, 김기세*, 이의준*, 정모**

Park, J. U.* , Kim, K. S.* , Lee, E. J.* , Chung, M.**

Key words : 프리즘창특징(Prismatic glazing characteristics), 태양열광복합집열기(Solar thermal light hybrid collector), 냉난방부하(Heating cooling load), 년간에너지성능평가(Annual energy performance assessment)

Abstract

PSHC(Prismatic Solar Hybrid Collector) is a passive solar system composed of prismatic acrylic glazing, glazing and ventilating fan. This PSHC system is applied to effectively reduce heating ventilation load as well as lighting load. But so far no method appraising thermal performance of this PSHC system has been developed yet. To assess thermal performance of the PSHC system, a prototype PSHC experimental facility and TRNSYS subroutine type-205 model have been developed in Korea Institute of Energy Research(KIER). The results indicated that 1)TRNSYS empirical model of PSHC has been properly modeled with actual performance data, 2)a more reliable source of weather data such as NASA and KIER weather station have been also obtained, and therefore, 3)the annual energy performance of PSHC could be assessed based on this proposed TRNSYS model.

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지부

* Department of Renewable Energy, Korean Institute of Energy Research

** 영남대학교 기계공학부 부교수

** Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University

1. 서론

최근 건축물이 고층화, 대형화되면서 건물내부의 냉난방이나 환기시스템이 HVAC 시스템에 의한 의존율이 높아지고 있는 상황에서, 건물의 기밀화 시공에 따른 실내공기 환경(IAQ : Indoor Air Quality)이 악화되어 다양한 현대병을 유발하는 등 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 따라서 정부에서는 실내 공기의 쾌적성 유지를 위하여 환기용 신선외기 도입량 증가 방안으로 법적 기준을 강화하고 있으며 이와 같은 경향으로 인하여 하계 및 동계시 외기를 예열 없이 건물로 직접 도입하므로 인하여 건물에서의 냉/난방 부하 증가를 일으키며 아울러서 냉/난방 에너지의 수요 증가 요인으로 작용하고 있다.

이런 상황에서 국내에서는 태양열을 이용하여 난방과 신선외기의 도입을 동시에 유도하는 대표적인 난방기술인 공기식 태양열 시스템개발 및 적용기술이 연구되고 있으며, 이미 서구 선진유럽에서는 Solar Air System을 건물에 적용하여 냉/난방에너지의 절감효과를 누리고 있다. 따라서 본 연구에서는 신선 외기도입, 난방부하 저감효과를 동시에 기대할 수 있는 복합 PSHC기술¹⁾에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 프리즘 렌즈를 이용한 PSHC 시스템을 설계 제작하여 시스템의 정량적인 열성능을 도출하고자

- 1) 한국에너지기술연구원 소재 실증시험 규모의 PSHC시스템을 대상으로 단기 열성능을 평가하여 실측 데이터를 근거로 시스템에서 태양일사량과, 시스템을 통해 얻어지는 실내유입 공기의 온도 상승률과의 상관관계식을 도출하고,
- 2) 얻어진 상관관계식을 근거로 하여 TRNSYS²⁾/type-205³⁾을 이용한 PSHC 시스템의 해석모델을 개발하고 타당성 평가를 수행하며,

- 3) 개발된 해석모델을 활용하여 PSHC 시스템의 연간 성능평가를 통한 시스템의 에너지 절감량을 예측하고 에너지 성능을 정량적으로 평가하여,
- 4) 기후조건 및 설계조건에 따른 PSHC 시스템의 정량적인 에너지 성능 및 추후 PSHC 시스템 최적화 설계를 위한 기초 자료 확보에 목적이 있다.

2. PSHC 시스템 개요

그림 1은 PSHC 시스템의 구성 및 태양열 태양광 이용기술 개념을 나타낸 그림으로써 시스템은 크게 1)프리즘 렌즈, 2)아크릴 형 창호, 3)건물외피 일체형 선택적 코팅 처리 집열기, 4)팬 및 필터로 구성된다.

그림에서 보듯이 동계에는 하계와 비교하여 태양고도가 상대적으로 낮은 고도각을 유지하므로 시스템에 설치된 프리즘 렌즈를 투과하는 태양복사가 프리즘렌즈의 특성에 의해 거의 대부분 실내로 유입된다. 이렇게 유입되는 태양복사 중 가시광선 영역은 실내 자연채광으로 활용되며, 투과 성분 중 단파복사 영역은 건물외피에 설치된 집열기에 흡수되어 실내 난방에 기여할 수 있도록 설계 되었다. 시스템의 하부 기공을 통해 유입되도록 유도된 신선외기는 건물외피에 부착된 집열면과 대류열전달에 의해 자연적으로 상부로 이동하게 되고, 건물 외표면 상부에 설치된 환기창의 에어필터에 의해 정화되어 실내로 유입되어 신선외기 도입 및 난방용으로 활용된다. 반면 하계에는 동계에 비하여 상대적으로 태양고도가 높게 유지되는데, 이때 프리즘 렌즈는 고반사, 저투과율을 형성하는 복사장벽의 역할을 하게 되므로 하절기 과열(Over heating) 문제와 난방부하를 저감시키는 역할을 하게 된다.

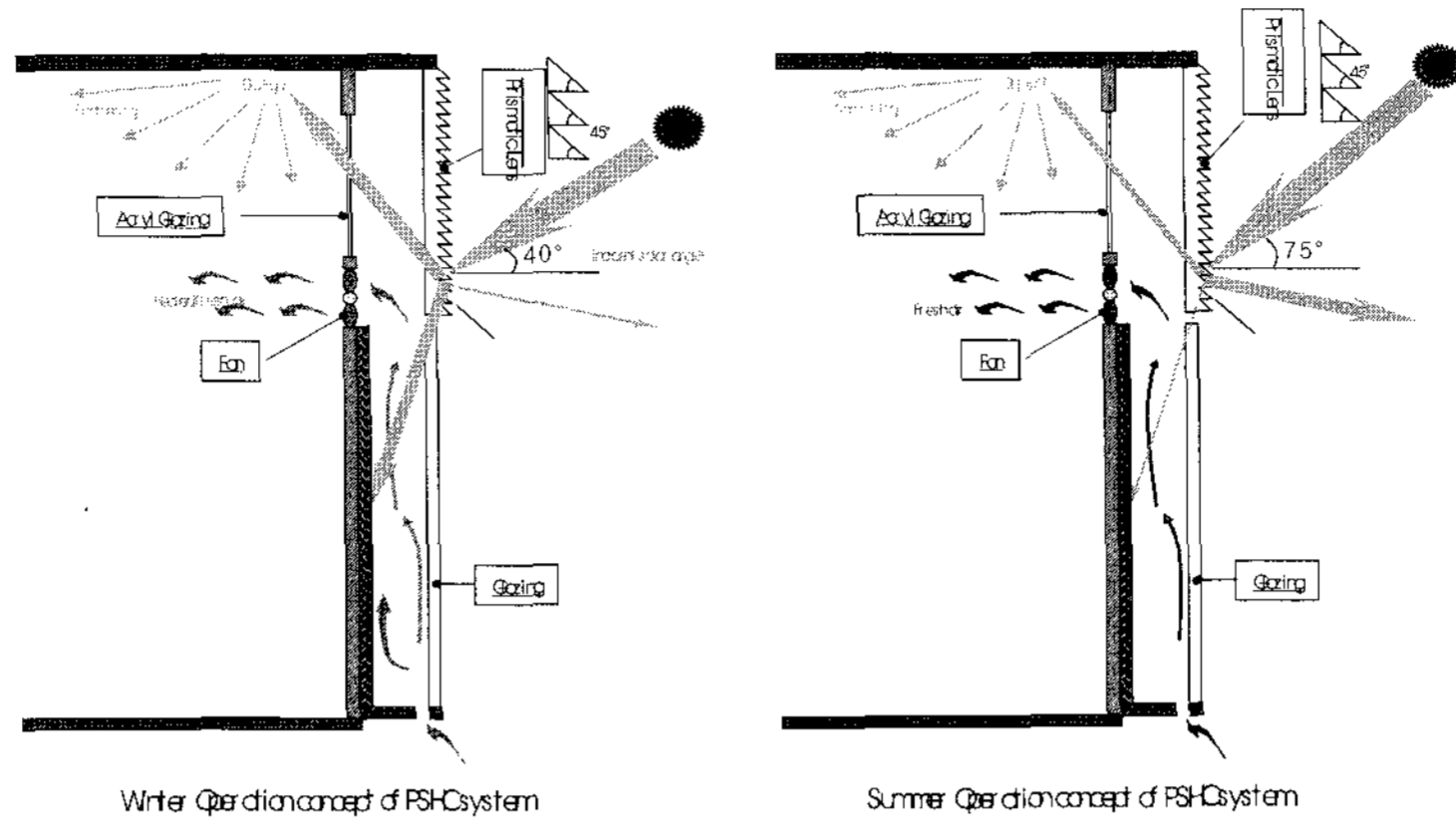


그림 1. PSCH 시스템 작동 개념도

3. 실험

그림 2는 한국에너지기술연구원의 PSCH 시스템이 적용된 TEST-CELL의 실측치 시스템 규모를 나타내고 있다. TEST-CELL의 주요 구조는 샌드위치 패널로 지어진 조립식 건물형태이며, 남향 전면부에 프리즘 렌즈, 아크릴 창호, 팬 및 필터로 구성된 PSCH 시스템이 부착되어 있다. 실험은 동일한 규모를 가지며 PSCH 시스템이 적용된 공간과 그렇지 않은 공간에서의 환경조건 비교를 진행하였으며 실험장치의 규모 및 사용된 주요 설비 재료에 대한 물성치는 표 1과 같다.

3.1 실험방법 및 측정 변수

PSCH 시스템의 열성능은 외기온 및 조사플럭스

(irradiance)와 같은 외기조건하에서 일정 팬에 의하여 건물 외벽에 설치된 집열면과 유리면 사이에서 가열된 PSCH 시스템 출구온도 즉 실내 유입 공기 온도를 기준으로 PSCH 시스템의 열성능 평가를 수행하였다.

실내 유입 공기의 온도는 조사플럭스, 외기조건 및 프리즘 렌즈 형상, 아크릴 창호 복사열 물성치, 팬 유량과 같은 변수에 의하여 특성이 달라진다.

본 실험에서는 조사플럭스, 외기온 및 팬 유량을 기준변수로 PSCH 시스템의 열성능을 평가하는 것으로 하였다. 그림 3은 기준변수 및 실온도와 같은 변수 측정을 위한 센서 설치 위치를 나타내고 있다.

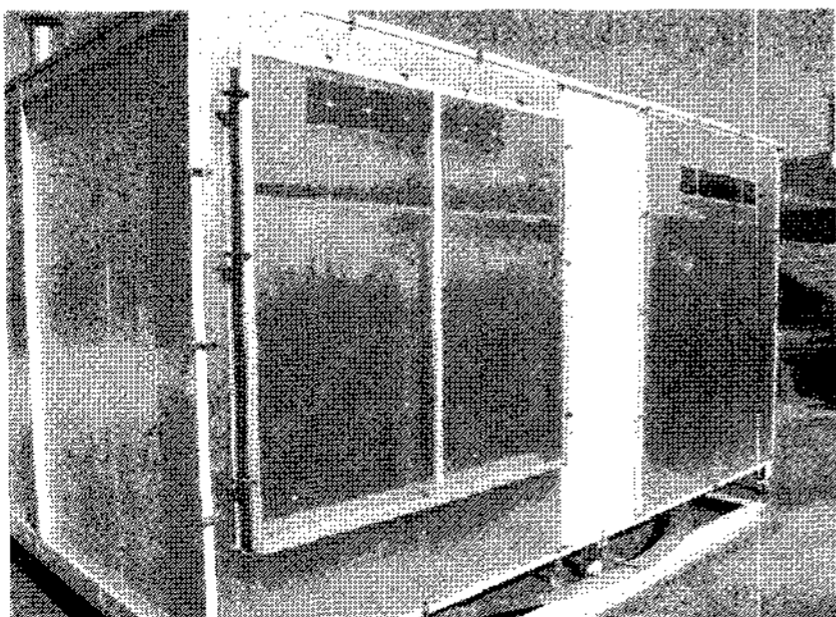


그림 2. PSCH 시스템이 적용된 실험장치

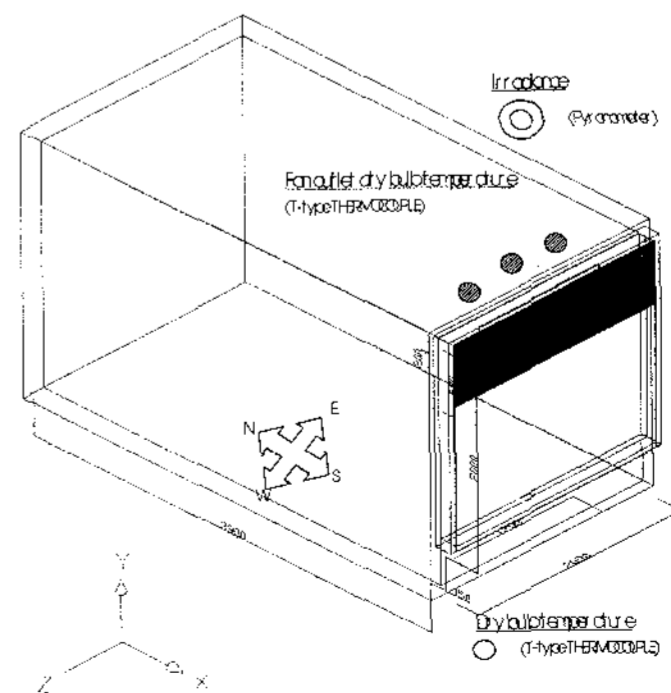


그림 3. PSCH 시스템 규모 및 측정센서 위치

그림 3에서와 같이 본 실험에서는 APPLY 사의 피라노미터 일사량계를 이용하여 조사플럭스를 측정하였으며 항온조에서 보정된 T-type 열전대를 통하여 외기온(열전대 1곳) 및 실 온도(열전대 3곳)를 측정하였다. 아울러 공기식집열기(air collector)에 비하여 상대적으로 실험기준 유량이 적은 저유량 280 kg/hr을 적용하였으며 이 유량은 베인유량계(vane flow meter)를 통하여 측정하였다.

표 1. PSHC 시스템 규모 및 적용재료 물성치

Description	Value	Unit
Building envelope		
W×H×D	3.9×2.4×2.0	m
South, north area	9.36	m ²
East, west area	4.8	m ²
Floor, Roof area	7.8	m ²
Wall, floor U*	0.15	W/m ² °C
Roof U*	0.07	W/m ² °C
Window U*	1.00	W/m ² °C
Prismatic lens		
H×D	0.9×1.2	m
Angle of Film	45	°
Glazing		
W×H×D	0.15×2.0×1.2	m
Fan		
Capacity	0.00785	m ³ /s

* Overall conductance for envelope

3.2 실험 결과

실험은 동절기인 2002년 1월중에 진행되었으며, 실험기간의 조사플럭스 조건하에서 PSHC 시스템 출구온도와 외기온과의 온도차이로 정의되는 온도 상승선도를 상관식 형태로 도출하였다. 단기 PSHC 시스템의 열성능 평가는 표 2와 같이 상대적으로 일사조건이 좋은 특정일(2002년 1월 7일)의 외기 조건하에서 수집된 데이터를 기준으로 평가하였다. 표 2의 조사플럭스와 외기 온 조건하에서 PSHC 시스템의 출구온도 즉 실 유입공기 온도를 기준으로 PSHC 시스템의 단기

열성능 평가를 위한 상관식을 온도상승 기준변수로 그림 4와 식 (1)의 형태로 도출하였다.

$$Y = 0.01796X + 1.59 \quad (1)$$

여기서,

Y : 온도상승도, PSHC 시스템 출구온도 및 외기온도차 [°C]

X : 수직면조사플럭스 [W/m²]

0.01796 : 온도상승선도의 기울기

1.59 : 온도상승선도의 절편을 나타낸다.

표 2. PSHC 시스템 열성능 데이터

1	2	3	4
0	-1	0	0
295	0	9	9
595	2.5	14.9	12.4
621	1.9	16	14.1
698	4	17.6	13.6
727	3.9	17.7	13.8
746	5.3	18.7	13.4

1 : Irradiance [W/m²],

2 : ambient inlet temperature [°C],

3 : PSHC outlet temperature [°C],

4 : temperature rise [°C]

따라서 온도상승도에 대한 상관식을 근거로 특정 외기온 및 조사플럭스에 대한 PSHC 시스템의 단기 열성능을 나타내는 온도상승도를 산술적으로 평가할 수 있었다. 아울러서 PSHC 시스템 중장기 열성능 평가용 모사프로그램으로 본고에서 선택한 TRNSYS 기반 부프로그램 type-205의 코드를 개발할 수 있었다.

4. 시뮬레이션

4.1 해석모델 개발 및 보정

PSHC 시스템의 열성능을 평가하기 위해 냉난

방 설비관련 해석 모사용 프로그램인 TRNSYS 프로그램을 활용하였다. 주요 활용코드로 type-205 부 프로그램을 활용하였으며, 본 연구를 통하여 TRNSYS의 부프로그램으로써 본고에서 개발 및 보정된 해석모델 type-205의 프로그래밍 구조 그림 5는 특정 외기조건하에서 비정상 입력(inputs)변수 외기온 및 수직면 태양조사플럭스항과 시간에 무관하며 시스템의 열적 거동 특성을 결정하는 변수(parameter)항, 식 (1)의 기울기 및 절편을 근거로 수학적 모델링을 통하여 산출되는 출력(outputs)항 실내 유입온도를 산정할 수 있도록 모델링 하였다.

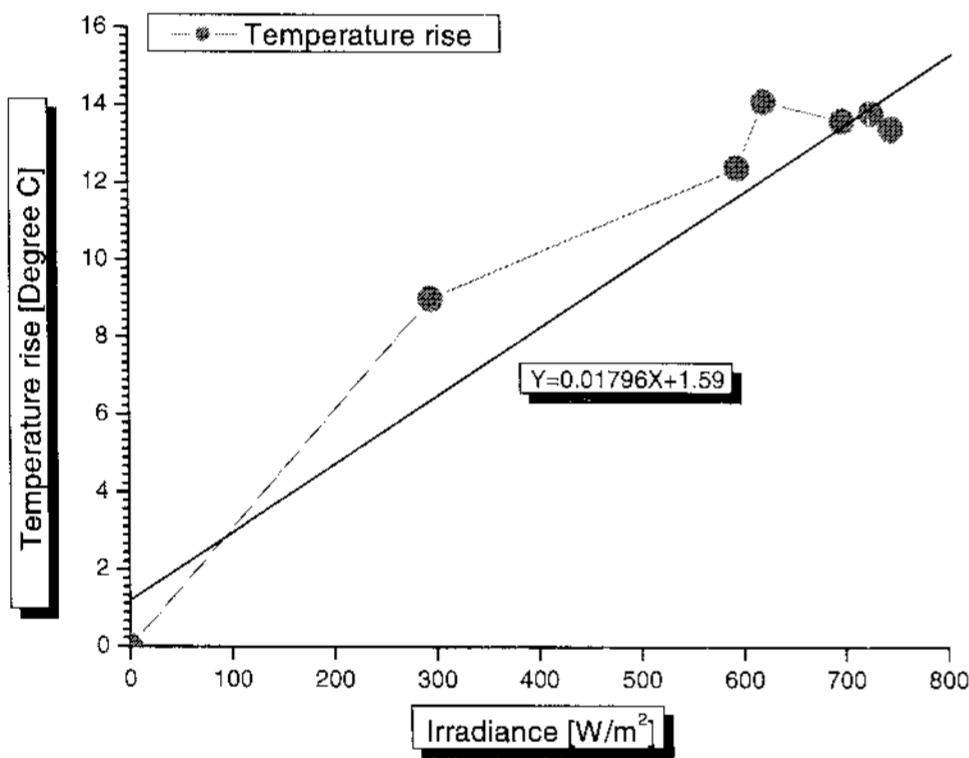


그림 4. PSHC 시스템 온도상승 선도

개발된 해석모델의 신뢰성 확보 및 PSHC 시스템의 실제조건 묘사 적합성을 판정하기 위해 실험이 진행된 기간에 실측되어진 표 2 기후 데이터 중 조사플럭스와 외기온을 근거로 하여 실내 유입온도로써 해석모델의 타당성을 검증하였다.

표 3과 그림 6은 실측실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. x-축은 조사플럭스를 나타내며 y-축은 조사플럭스에 의한 온도상승도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과와 시뮬레이션 결과는 거의 유사한 특성을 나타내며 변화하는 것으로 나타나 TRNSYS/type-205로 모델링 된 PSHC 시스템의 해석모델은 실

제 조건과 유사하게 모델링 되어졌음을 확인할 수 있었다.

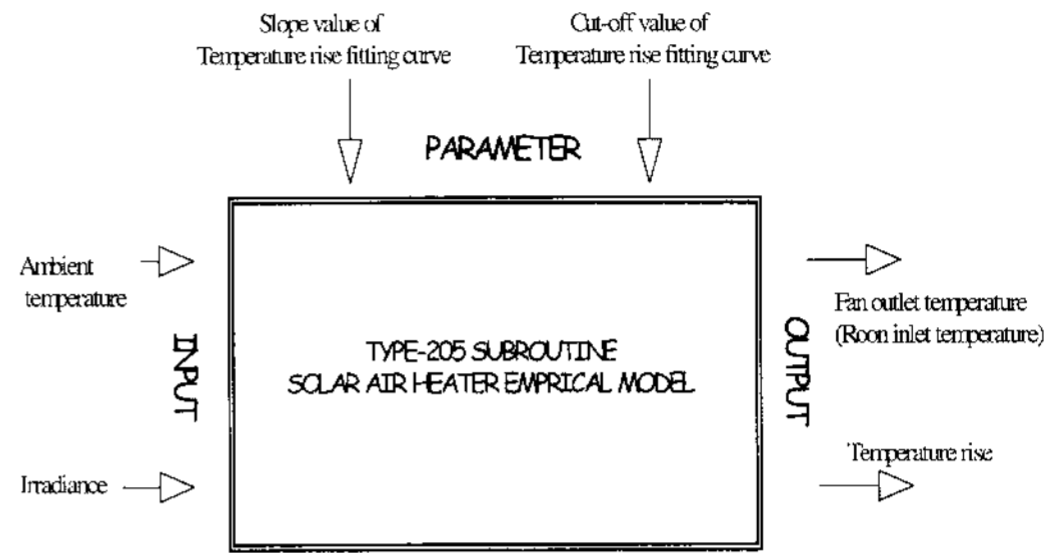


그림 5. Type-205 부프로그램의 프로그래밍 구조와 변수항 및 입출력항

표 3. 실측치 실내 유입온도와 TRNSYS 시뮬레이션 실내 유입온도의 비교

Irradiance (W/m²)	Type-205 outlet temperature	
	Experimental	TRNSYS
0	0.0	0.0
295	9.0	7.2
595	14.9	14.3
621	16.0	15.0
698	17.6	17.6
727	17.7	18.3
746	18.7	19.5

4.2 PSHC 시스템의 연간 성능평가

PSHC 시스템 중장기 연간 열성능은 월별태양 열유용에너지, 년간에너지성능지수 및 집열 효율을 근거로 각각 식 (2), (3) 및 식 (4)를 근거로 평가하였다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{in} - T_{amb}) \quad (2)$$

$$EP = \left(\sum_{i=Jan}^{Dec} \dot{Q} \right) / A \quad (3)$$

$$\eta = \dot{Q} / (A \times I_T) \quad (4)$$

여기서,

\dot{m} : 팬 유량 [kg/hr]

- C_p : 공기의 정압 비열 [kJ/kg-°C]
- T_{amb} : 외기온도 [°C]
- T_{in} : PSHC 시스템 출구온도 [°C]
- A : 아크릴창호의 설치 면적 [m²]
- I_T : 수직면 조사플럭스 [kJ/hr-m²]

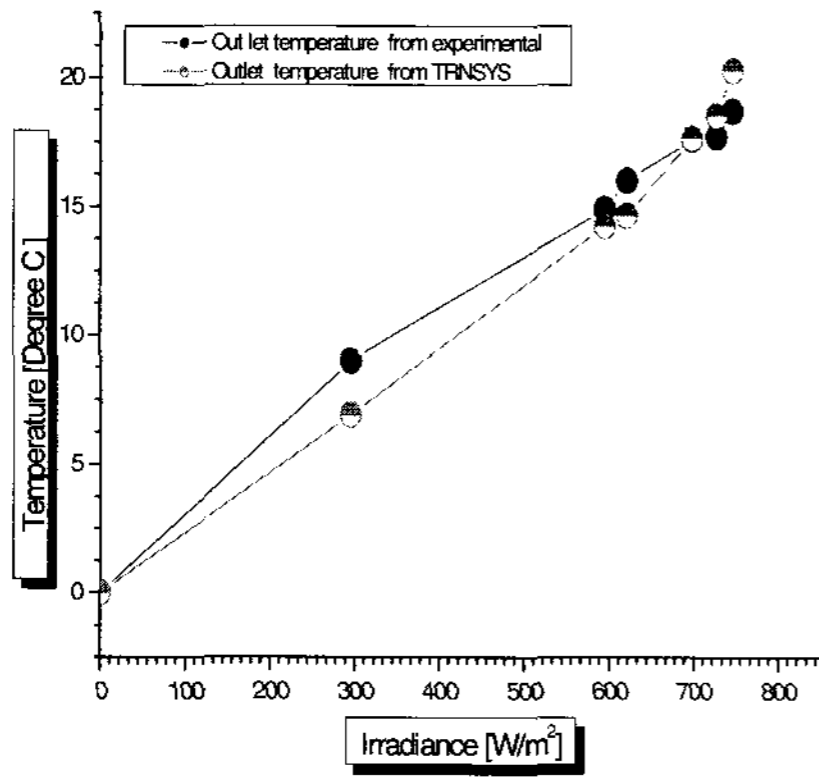


그림 6. 태양 조사율 변화에 따른 실내 유입온도의 실험 및 시뮬레이션 결과 비교

Type-205 해석모델을 이용한 시스템의 열성능 평가는 그림 7과 같이 전처리, 시스템설비 처리 및 후처리 단계로써 시스템을 구성하여 평가하였다. 전처리단계의 주요 모델로는 기상자료발생기 type-54, 일사량 직산분리 및 경사면 일사량 처리기 type-16을 적용하였다. 처리단계로써 PSHC 시스템 모델 type-205와 후처리 단계로써 적분기 type-24 및 Online-Plot type-65를 사용하였다.

일반적인 태양열시스템 해석 프로그램에서는 시스템의 열성능 평가를 위해서는 체계적인 분석 처리를 거쳐 검증된 기상데이터 선정이 선행되어야 한다.

본고에서의 북위 36.18° 동경 127.24°에 위치한 대전 지역의 기상데이터는 한국에너지기술연구원에서 1982~2000년에 걸쳐 수집 통계화 처리된 월일평균데이터 KIERWS(KIER weather

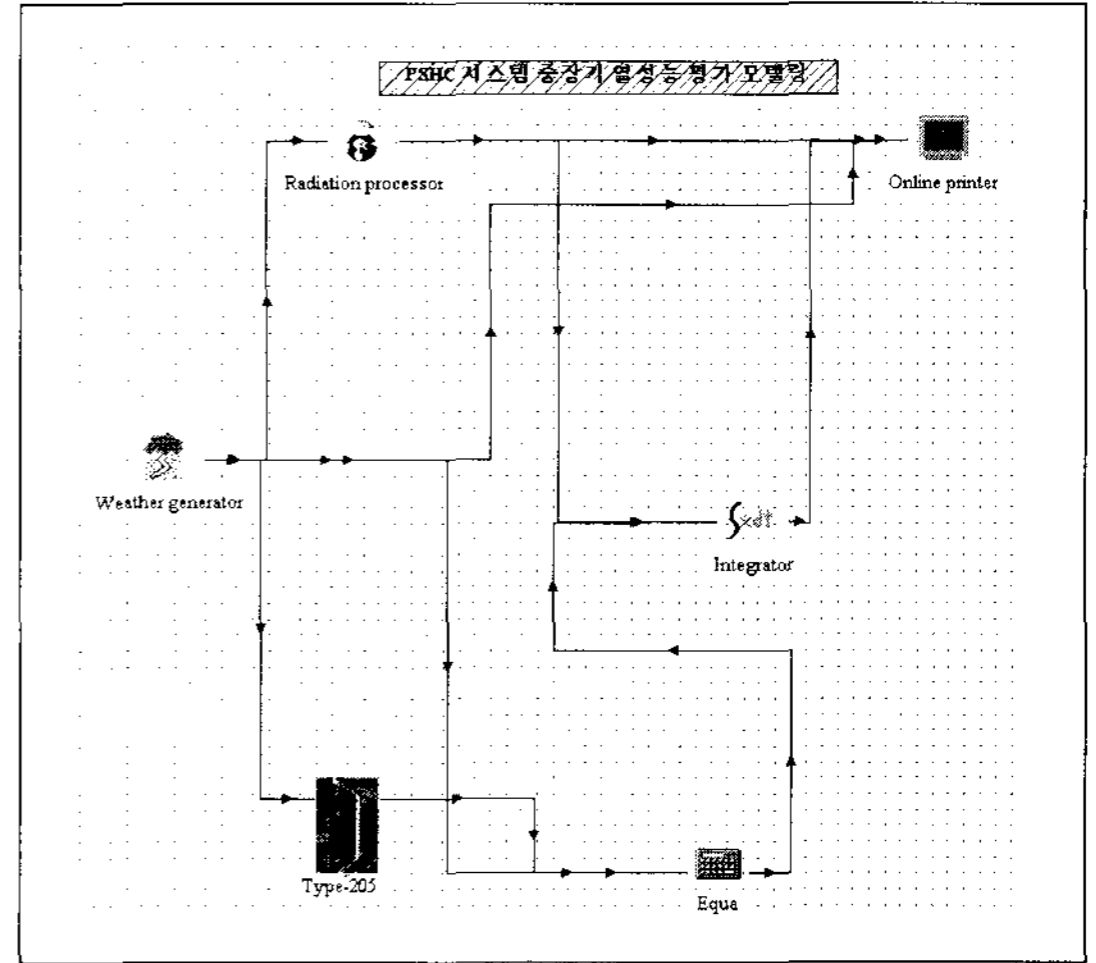


그림 7. TRNSYS 해석 모델 구성

station)를 근거로 시간별 기상 발생기 type-54의 선 처리를 통하여 선정하였다. 아울러서 대전(위도 37.5°, 경도 126.5°)지역을 대상으로 NASA 제공 기상데이터⁴⁾와 KIERWS의 비교를 통하여 기상데이터의 신뢰 타당성 분석을 수행하였다.

그림 8은 NASA와 KIERWS에서 제공하는 월별 월일평균 외기온 및 월일평균 조사플럭스를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 x-축 월별 시간 대비 y-축 월일평균 외기온 및 월일평균 조사플럭스의 오차를 확인할 수 있었으나 데이터 수집 방법상의 차이에 의한 오차이므로 KIERWS 데이터의 타당성 근거를 확인할 수 있었다.

4.3 시뮬레이션 결과

PSHC 시스템의 열성능 모사 프로그램으로써 개발 및 타당성이 증명된 type-205 PSHC 시스템 해석모델을 대상으로 한국에너지기술연구원 발간 KIERWS 기상데이터를 대입하여 PSHC 시스템의 중장기 태양열 유용 에너지양과 이에 근거한 시스템의 연간 에너지성능을 평가하였다.

표 4 및 그림 9는 KIERWS 평균기상자료에 근거한 PSHC 시스템의 각 월별 태양열 유용에

너지의 누적치를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 비교적 청명한 청공상태를 유지한다고 판단되는 3월과 10월에서 시스템의 유용 에너지양이 가장 많은 것으로 나타났으며, 계절적으로 장마철이 진행되고 태양 고도 각이 높아지는 7, 8월에는 동계에 비교하여 상대적으로 태양열 유용 에너지양이 가장 작은 것으로 나타났다.

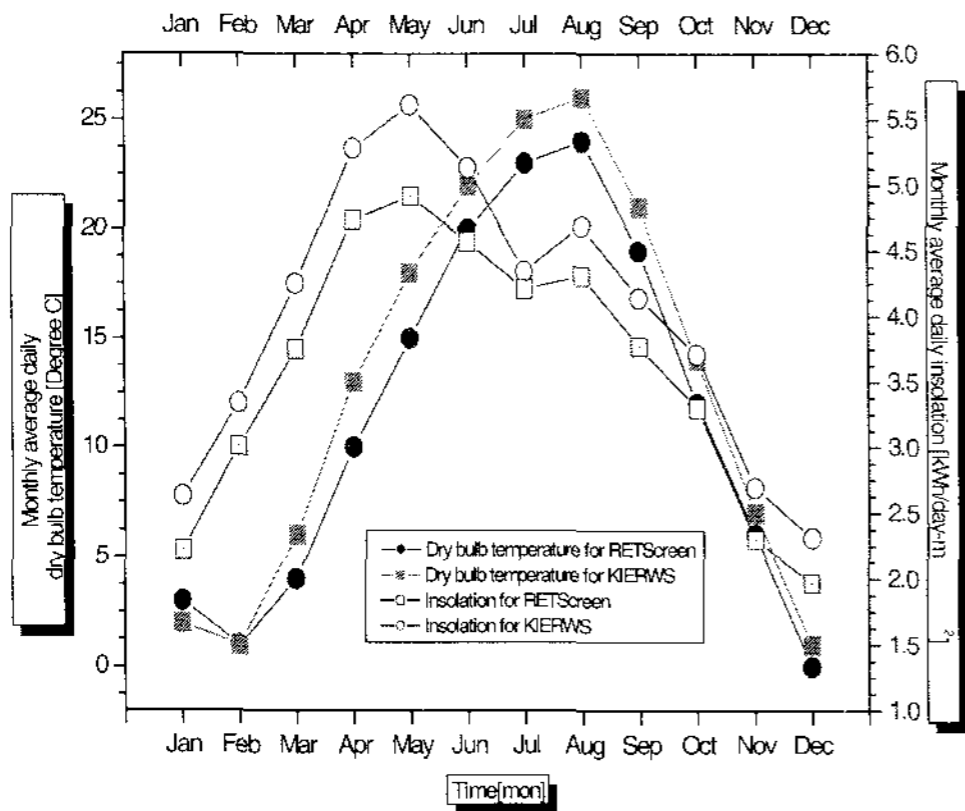


그림 8. NASA 및 KIERWS 기상 데이터 비교

표 4. PSHC 시스템의 중장기 열성능 평가 주요 입력 및 출력 변수

	Input		Output	
	1	2	3	4
Jan	1.7	61.72	24.56	9.95
Feb	0.5	66.37	22.58	8.51
Mar	5.8	70.82	24.72	8.73
Apr	12.7	71.03	23.01	8.10
May	17.9	66.66	21.02	7.88
Jun	22.2	52.76	18.77	8.89
Jul	24.8	55.94	19.37	8.66
Aug	25.8	70.98	21.41	7.54
Sep	20.6	79.27	22.22	7.01
Oct	14.1	77.90	25.13	8.06
Nov	7.3	57.29	21.90	9.56
Dec	1.1	51.89	22.83	11.0

- 1 : Ambient temperature [°C],
- 2 : Vertical surface insolation [kWh/mon-m²],
- 3 : Solar useful energy [kWh/mon],
- 4 : PSHC system efficiency [%]

이는, 년중 계절별 태양고도가 동절기에 가장 낮으며 상대적으로 하절기에 가장 높으므로 인하여 동절기에 비하여 하절기에 측정되는 수직면 일사량이 작은 것에 일차적 원인이 있으며 그림 1. PSHC 시스템 작동 개념도 에서와 같이 동절기 태양복사 투과특성이 좋은 45°의 프리즘 렌즈의 투과 및 반사특성에 의하여 동절기 태양복사 투과성이 하절기 태양복사 투과성에 비하여 상대적으로 큰 원인에 의한 것으로 사료되어진다.

PSHC 시스템의 성능은 연간 에너지 성능지수 식 (3) 및 시스템 효율 식 (4)를 통하여 0.12[MWh/m²-yr](0.432[GJ/m²-yr])과 8.657 [%]인 것으로 평가되었다.

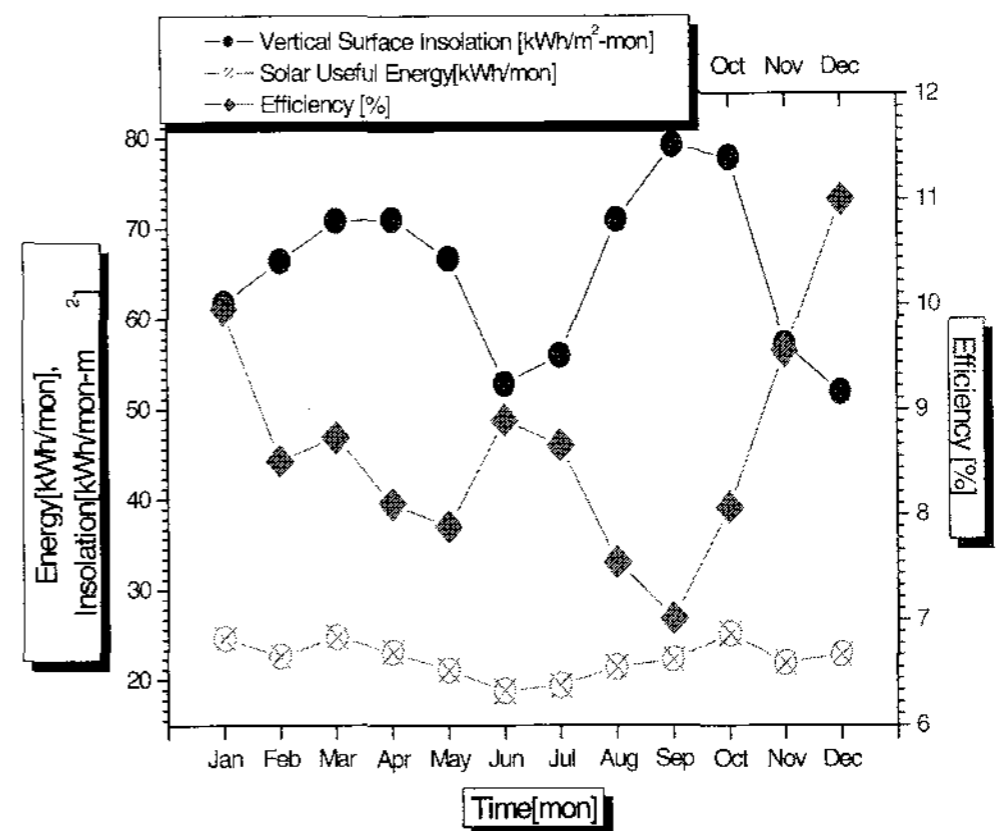


그림 9. 월별 수직면 일사량, 태양열 유용에너지 및 PSHC 시스템 효율

5. 결론

난방에너지 절감방안의 하나로 프리즘 필름을 이용한 복합 공기식 집열 시스템의 정량적인 에너지성능 도출 및 최적화 설계 기초자료 확보를 위해, 한국에너지기술연구원 내에 제작된 PSHC 시스템의 실험 및 시뮬레이션을 수행한 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) PSHC 시스템 적용 TEST-CELL 실험을

통해 수직면 일사강도에 따른 실내 유입온도의 상승작용에 관한 상관관계식을 도출하였으며, PSHC 시스템의 단기 열성능 평가 결과로써 시스템에 의한 온도 상승도는 동절기를 기준하여 최대 20°C까지 상승하였다.

- 2) 태양열 이용 에너지절감 설비의 해석을 위한 시뮬레이션 기초 자료인 기상데이터 분석에서는 NASA 위성자료와 KIERWS 기후자료의 신뢰성 분석을 통해 KIERWS 자료의 시뮬레이션 활용 신뢰성을 확보하였다.
- 3) PSHC 시스템의 실험결과를 근거로 하여 TRNSYS 기반 Type-205를 활용하여 PSHC 시스템의 해석모델을 개발하였으며, 실험결과 및 시뮬레이션 결과의 비교 분석을 통해 개발된 해석모델의 타당성을 제시하였다.
- 4) PSHC 시스템 연간 열성능 평가 기준 변수로 월별 누적 태양열 유용 에너지는 0.018~0.025[MW/mon], 연간 평균 에너지 성능은 0.12[MWh/m²-yr], 효율은 8.657[%] 인 것으로 나타났다.

PSHC 시스템의 경우 시스템의 주요구성 요소인 프리즘 렌즈는 입사되는 태양일사의 고도 각에 따라 반사와 투과 특성이 명확하게 구분되어 제어되는 시스템으로써, 제시된 열성능 이외에도 자연채광을 이용한 조명에너지 절감효과에도 특별한 성능을 기대할 수 있는 시스템이다.

본 연구에서는 PSHC 시스템의 열성능 부분에만 초점을 맞추어 진행하였으나, 프리즘 특성에 따른 자연채광 유도에 의한 조명에너지 절감성능

에 대해서도 실험이 진행되고 있는 상황이며 곧 연구결과가 발표될 예정이다.

본 연구를 통하여 향후 본 시스템과 같은 태양에너지 이용 설비에 대한 성능예측 및 프리즘 렌즈를 이용한 다양한 설비시스템을 개발하는데 상당한 도움이 되리라 판단되며 개발되어진 TRNSYS 기반 Type-205 모델을 통하여 PSHC 시스템의 최적 설계 도구로써 이용되어질 수 있을 것으로 사료되어진다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 대체에너지 기술개발 사업의 일환으로 수행되고 있는 연구 결과의 일부이며, 연구수행에 지원을 준 산업자원부에 감사한다.

참고문헌

1. 한국에너지기술연구원, 프리즘형 태양열광 복합 집열기 개발 선행연구 사업계획서, 산업자원부, 2002. 5. 1
2. Klein S.A., et al. TRNSYS 14.2 Main Manual, Solar Energy Laboratory, Univ. Of Wisconsin -Madison, Madison WI, 1997. 3.
3. 박준연, 무창기공집열기 단위 모듈 및 태양열 공기 가열 시스템 열성능 평가 방안과 모델 개발, 박사 학위논문, 영남대학원, 2002.
4. Charles Whitlock, surface meteorology and solar energy, NASA. <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi>