한국지열에너지학회논문집
Korea Society of Geothermal Energy Engineers
Vol. 16, No. 4, pp. 9~15 (2020)

ISSN 1738-6985 (Print)
ISSN 2713-9174 (Online)
https://doi.org/10.17664/ksgee.2020.16.4.009

지붕형 태양광발전 패널의 공장 지붕 설치에 따른 냉방 및 난방 부하 변화량 연구

조호현 · 김정민* · 김영일**†
서울과학기술대학교 일반대학원 건축과 석사과정, *다공 에스앤티 이사,
**서울과학기술대학교 건축학부 교수

A Study of Cooling and Heating Load Changes with Roof Type Solar Panels Installed on Factory Roof

Ho-Hyeon Jo, Jung-Min Kim*, and Young Il Kim†**
Master degree graduate student, Graduate School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
**Executive Director, Dakong Smart & Construction Technical Solution, Seoul 01811, Korea*
***Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea*

Abstract

In this study, effect of reinforced insulation on heating and cooling loads were studied due to installation of PV panels on factory building roof with a floor area of 12,960 m^2. For PV panel installation, combination of aluminum, polyurethane, air, polystyrene and steel materials were added to the original roof, which increased thermal insulation performance. Half of the roof were covered with PV panel and the other half without. Temperature and relative humidity were measured for 8 days during summer season for both indoor spaces. PV panel showed the effect of lowering the indoor space temperature by 0.6°C. TRNSYS dynamic simulation showed that with PV panel, cooling load per area is reduced by 1.7 W/m^2 and heating by 10.0 W/m^2. PV panels installed on building roof not only generate electricity but also can save energy by reducing cooling and heating loads.

Key words: Cooling load(냉방부하), Factory roof(공장 지붕), Heating load(난방부하), Insulator(단열재), Photovoltaic panel(태양광 패널)

기호 설명

A : 면적 [m^2]
h : 대류열전달계수 [$W/m^2℃$]
$\dot{q}$: 단위면적당 열전달율 [W/m^2]
$\dot{Q}$: 열전달율 [W]
R : 열저항 [m^2K/W]
T : 온도 [℃]

그리스 문자

σ : Stephan-Boltzmann 상수, 5.670×10^{-8} W/m^2K^4
ε : 방사율 [-]

†Corrresponding author
Tel: +82-2-970-6557, Fax: +82-2-974-1480
E-mail: yikim@seoultech.ac.kr
접수일: 2020년 09월 02일
심사일: 1차:2020년 09월 29일, 2차:2020년 11월 04일
채택일: 2020년 11월 04일

하첨자

air : 공기
conv, s, o : 외부 표면 대류열전달
cplg : 에어노드 또는 경계조건
c, s, i : 내부 환경에 의한 열전달
c, s, o : 외부 환경에 의한 열전달
comb, s, i : 표면에서의 복사 대류 열전달
equipv, i : 내부 기기
g, c : 사람, 조명 기기(실내 발열원)
inf : 외부 공기 침기
ishcci : 영역의 모든 음영장치에서 흡수한 태양복사
r, s, i : 내부 표면에서의 순복사 열전달
r, s, o : 외부 표면에서의 순복사 열전달
sky : 천공
s, i : 내부 표면
s, o : 외부 표면
solair : 태양열에 의해 가열된 공기
solar, i : 외부 창을 통해 들어오는 태양복사
surf : 벽체 표면
star : 공기 중심점의 대류 및 다른 벽 및 창문 요소에 대한 방사선에 의한 벽 표면으로부터의 병렬 에너지 흐름{무슨 의미?}
vent : 환기

1. 서 론

1.1 연구 배경

신재생에너지 공급의무화제도(RPS) 규정에 따라 건축물에 일정 비율 이상의 신재생에너지 시스템 설치가 의무화 되었다(2020년 기준 7%)[1]. 대표적인 신재생에너지원으로는 지열에너지, 태양광 발전, 풍력 발전 등이 있다. 지열에너지 시스템은 천공 공사비용이 많이 소요되므로 대부분의 경우 태양광 패널 설치를 선호한다. 태양광 패널은 거치형 태양광 발전시스템(BAPV)과 건물일체형 태양광발전시스템(BIPV)이 있으며 비용이 저렴하고 설치가 용이한 거치형 태양광발전이 많이 사용되고 있다. 본 연구는 지붕에 거치형 태양광 발전 시스템이 설치되어 있는 공장 건물을 대상으로 태양광 패널 설치 여부에 따른 공조 부하 변화량 연구를 수행하였다.

1.2 연구 목적 및 연구 목표

Shin[2]은 외벽 구성 변경이 냉난방에너지 요구량 및 소요량에 미치는 영향에서 단열재를 중심으로 비교하였다. 그러나 태양광이 설치되었을 시의 환경에 대해서는 분석이 이루어지지 않았다. Venkiteswaran [3]은 폴리스티렌과 흰색 페인트 지붕에 의한 단열 성능을 CFD를 통해 분석하였고 그 결과 온도 및 에너지 소비가 감소한다는 사실을 연구했다. Güneş[4]는 ASTM D2303의 기준을 참고하여 습도, 오염 등에 대한 폴리우레탄의 수명을 예측하였다. 본 연구에서는 실내 환경 ?·습도를 측정하고 동특성 시뮬레이션 프로그램 TRNSYS를 활용하여 태양광 패널의 공장 건물 지붕 설치 시, 지붕재료의 구성 변화가 냉방 및 난방 부하에 미치는 영향을 분석하였다.

1.3 연구 방법

본 연구에서 태양광 패널의 설치가 냉난방부하를 저감할 수 있는지 알아보기 위하여, 실제 공장건물에 대하여 설치 유무에 따른 실내 온도 및 습도를 측정하고 및 공조부하의 변화량을 비교하였다. 지붕 구성재료의 변화가 공조부하에 미치는 영향을 TRNSYS를 이용하여 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 열 평형 계산

2.1.1 TRNSYS Type 56 Multi zone building

Fig. 1은 TRNSYS Type 56 multi zone building의 실내 공간의 에너지 평형 모델이다. 이 모듈은 각 존

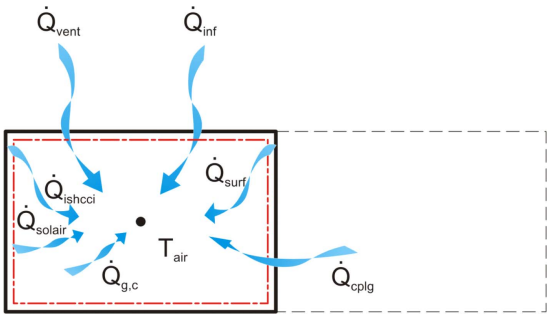

Fig. 1. Heat balance of an air node.

을 한 개의 공기노드로써 나타내고 전달함수법에 근거하여 공간에서 일어나는 열취득과 열평형을 고려한 동적 열에너지 해석이 수행된다[5].

Type 56의 일반적인 계산 방법은 다음과 같은 과정으로 진행된다. 공간 내 표면과 공기노드로의 대류 및 장파 복사 열교환은 스타 네트워크를 사용하여 계산된다. 이 방법은 T_{star}를 사용하여 공기 노드로 대류하고 다른 벽 및 창문 요소에 대한 방사선에 의한 벽 표면으로부터의 병렬 에너지 흐름을 고려한다[6]{무슨 의미?}.

2.1.2 열 평형 계산식

공기노드에서의 대류 열전달 식은 다음과 같다[6].

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{\infty,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad (1)$$

외부의 열전도식은 다음과 같다.

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o}, \quad (2)$$

$$\dot{q}_{comb,s,o} = h_{conv,s,o}(T_{a,s} - T_{s,o}) - \sigma\varepsilon_{s,o}(T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad (3)$$

내부의 열전달 식은 다음과 같다.

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (4)$$

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equipv,i}A_{s,i}}(T_{s,i} - T_{star}) \quad (5)$$

3. 결 과

3.1 대상 건물

연구 대상 건물 현황 및 측정 방법을 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다.

아산에 위치한 바닥 면적 12,960 ㎡ 공장 F 건물의 지붕의 반은 태양광 패널이 설치되어 있고, 나머지 반은 설치되어 있지 않다. 태양광 모듈 설치를 위해 기존 지붕 위에 부직포 + 폴리우레탄 + 칼라강판이 추가 설치되었다.

기존 건물의 각 부위별 단면은 Table 2와 같이 구성되어 있으며, 기존 건물 대비 변경된 것은 태양광

(a) (b)

Fig. 2. Factory roof photo. (a) Without PV panel, (b) With PV panel.

Table 1. Summary of S factory building

Item	Contents
Company	S Engineering
Location	Asan-si, Chungcheongnam-do
Usage	Factory
Solar power capacity	6 MW
T & H measurement	Four points inside building F
Measurement period	June 25-July 2, 2019
Measurement interval	1 minute

Table 2. Building wall component

	Material	L	k	c	ρ	U
Wall	Concrete wall	0.270	0.51	1	1,400	-
	Stainless steel	0.002	16.27	0.11	0.1	-
	Mineral wool	0.100	0.05	0.9	80	-
	Stainless steel	0.002	16.27	0.11	0.1	-
	Total	0.374	-	-	-	0.370
Floor	Concrete floor	0.5	0.51	1	1,400	-
	Total	0.5	-	-	-	0.869
Roof	Polystyrene	0.02	0.03	1.25	20	-
	Steel	0.03	15	1.8	7,800	-
	Total	0.05	-	-	-	1.210

L : Thickness [m]
k : Thermal conductivity [W/(m·K)]
c : Specific heat [kJ/(kg·K)]
ρ : Density [kg/㎥]
U : Total heat transfer coefficient [W/(㎡·K)]

패널 설치를 위해 추가된 지붕 구성재료이다. 지붕 재료 구성은 Fig. 3과 같으며, 기존 지붕의 구성은 Table 2, 개선된 지붕의 구성은 Table 3에 나타내었다.

Table 2와 3의 차이는 추가된 지붕 구성재료 외에 공기층이 생겼다는 점이다. 공기층은 단열성능이 우

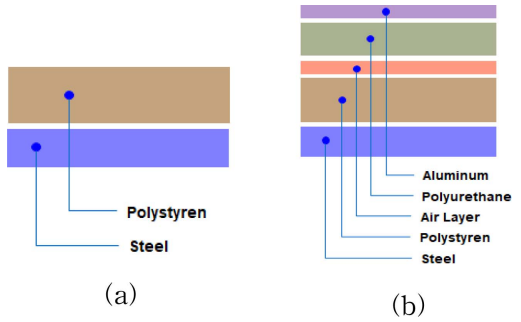

Fig. 3. Roof layer. (a) Without PV panel, (b) With PV panel.

Table 3. Layer component of PV installed roof

Material	L	k	c	ρ	R or U
Aluminum	0.02	720	0.96	2,700	-
Polyurethane	0.04	0.028	1	40	-
Air	-	-	-	-	R=0.169
Polystyrene	0.02	0.03	1.25	20	-
Steel	0.03	54	1.8	7,800	-
Total	0.110	-	-	-	U=0.356

수하여 실제 건축물에도 많이 적용되는 단열 방법이다. 지붕 구성 요소에서 공기층의 열저항은 R_{air}= 0.047 (h·㎡·K)/kJ=0.169 (㎡·K)/W라고 가정하였다.

3.2 데이터 측정

Fig. 3의 지붕에 대하여 지붕 구성재료 차이에 따른 실내 환경변화를 보고자 지붕 한쪽에는 태양광 패널 설치, 다른 쪽에는 기존 지붕 구성재료가 그대로인 공장 건물을 선정하였다. 실내 열환경 변화를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 태양광 패널이 설치된

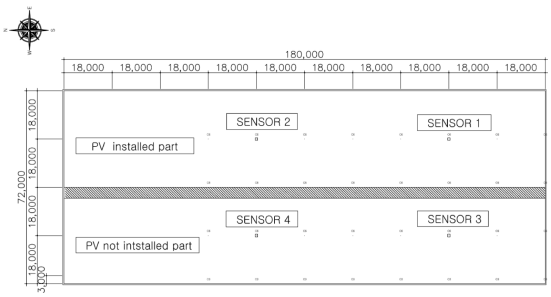

Fig. 4. Measurement locations inside F building. Height 5 m.

Table 4. T-TEC 7 Specification

Item	Value	Image
Model	T-TEC7	
Measurement	T and RH	
Temperature range	-40℃~85℃	
Relative humidity range	0~100%	
Accuracy	T ±0.2℃ RH ±3%	
Storage	10,600 data	

하부 공간의 내부 기둥에 1, 2번 센서, 태양광 패널이 설치되지 않은 하부 공간 내부 기둥에 3, 4번 센서를 설치하였다.

데이터 수집에는 독립형 온습도 센서 T-TEC7을 사용하였으며 계측기 사양은 Table 4와 같다. 2019년 6월 25일부터 7월 2일까지 8일 동안 1분 단위로 온도 및 상대습도를 측정하였다.

3.3 측정 결과

Fig. 5은 공장 내의 온습도 변화를 보여준다. 평균 온도 차 기준 태양광 패널이 설치된 곳의 2번 센서가 4번 대비 0.6℃ 낮았고, 최대온도차 기준으로는 2번 센서가 1.8℃ 낮았다.

태양광 모듈 설치로 인한 단열성능 개선이 일사부하 감소 효과로 실내온도를 낮춰주는 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

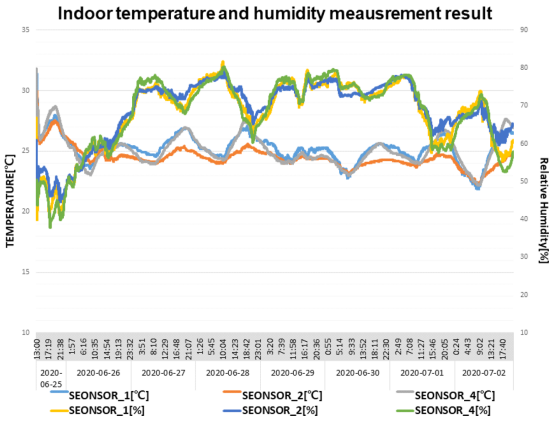

Fig. 5. Measurement of temperature and relative humidity.

Table 5. Temperature measurement result

Sensor	PV panel installation	Temperature Range(℃)	Remark
1	Yes	21.9~31.4	-
2		22.2~30.0	-
3	No	-	Excluded
4		22.2~31.8	-

3.4 TRNSYS 시뮬레이션

실내 및 실외 조건을 실제와 유사하게 모델링하여 동특성 에너지 분석이 가능한 TRNSYS를 활용하여 건물의 냉방 및 난방 부하를 산출하였다. 시뮬레이션에 적용된 조건은 Table 6과 같다.

Table 6의 조건을 적용하여 건물을 모델링 한 후, Fig. 6과 같이 TRNSYS simulation studio를 구성하였다. 기상데이터는 TRNSYS 내 TMY2 형식의 현장과 근접한 위치의 광주 데이터를 사용하였다. Fig. 7 광주의 표준기상데이터의 온·습도를 분석하면 우리나라의 일반적인 하절기의 고온다습, 동절기의 한랭건조의 특성을 잘 보여준다. {sky cover?}

Table 6. Internal load and comfort conditions

Item		Contents
Internal heat	Light	11.8 W/m^2
	Equipment	8.3 W/m^2
Comfort	Metabolism	1.6 met (Standing, light work)
	Clothing	1.0 clo (Typical business suit)
	Air velocity	0.15 m/s
ACH		20 1/h

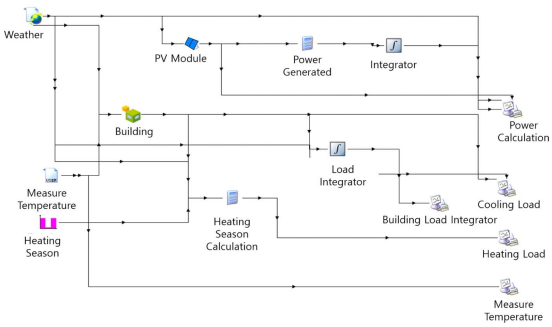

Fig. 6. TRNSYS simulation studio.

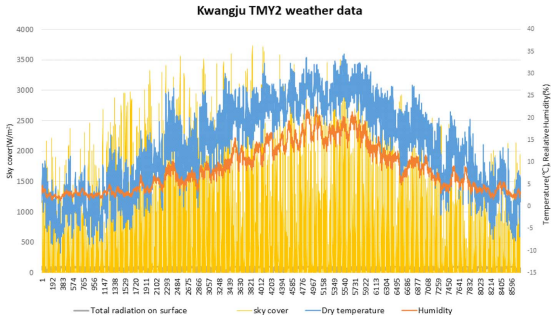

Fig. 7. Weather data.

3.5 시뮬레이션 결과

3.5.1 냉방부하 비교

열쾌적을 느끼는 실내 설정온도 24~28℃ 범위에 따라 냉방부하 변화를 비교하였다.

Fig. 8에서 보여 주는 바와 같이 실내 설정온도 24℃일 때 태양광 발전 패널 설치 후 냉방부하는 미설치 대비 가장 많은 38 kW, 절감율 2.1%, 면적당 냉방부하 감소량은 1.7 W/m^{2}이었다. 설정온도 28℃일 때는 가장 적은 10 kW, 0.9%가 절감되었다.

Table 7은 냉방시 설정온도에 따른 냉방부하, 태양광 패널 설치에 따른 절감량, 절감율을 제시한다. PV 패널 설치에 의한 지붕 단열성능 강화로 냉방부하는 평균 22 kW, 1.4% 절감되는 것을 알 수 있었다.

3.5.2 난방부하 비교

태양광발전 시스템 설치 여부와 실내 설정온도

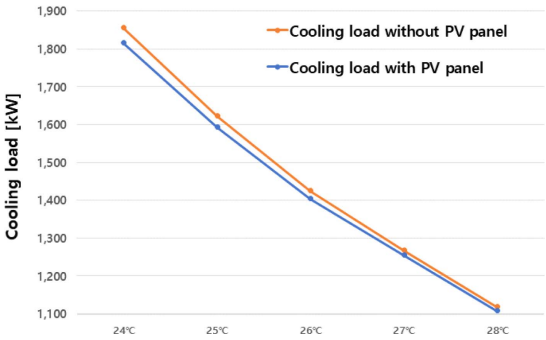

Fig. 8. Cooling load with and without PV panel.

Table 7. Cooling load comparison

T_{set} (℃)	Cooling load (kW)			Percentage reduction (%)
	Without PV panel	With PV panel	Difference	
24	1,853	1,815	38	2.1
25	1,621	1,591	30	1.9
26	1,423	1,403	20	1.4
27	1,266	1,253	13	1.0
28	1,117	1,107	10	0.9
Average			22	1.4

20~24℃ 범위에 따른 난방부하 변화량, 절감량, 절감율 비교 결과는 Fig. 9, Table 8과 같다. 실내 설정온도 24℃일 때 태양광 발전 시스템 설치 후 난방부하는 150 kW, 절감율 3.5%, 단위면적당 난방부하 감소량은 10.0 W/m^{2}로 가장 많이 절감되었다. 20℃일 때 태양광발전 시스템 설치 후 난방부하는 95 kW, 절감율 2.8%로 가장 적게 절감되었다. 동절기 쾌적성 범위에서 난방부하는 평균 130 kW, 3.3% 절감되는 것을 알 수 있었다.

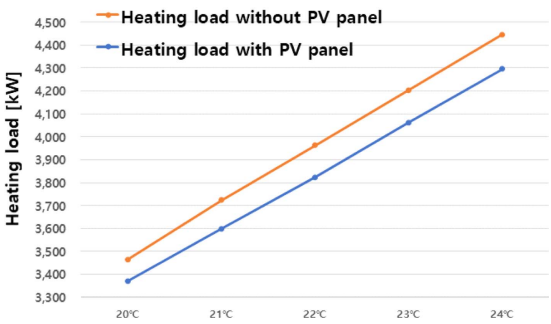

Fig. 9. Heating load with and without PV panel.

Table 8. Heating load comparison

T_{set} (℃)	Heating load (kW)			Percentage reduction (%)
	Without PV panel	With PV panel	Difference	
20	3,466	3,371	95	2.7
21	3,724	3,599	125	3.4
22	3,963	3,824	139	3.5
23	4,204	4,062	142	3.4
24	4,446	4,296	150	3.4
Average			130	3.3

4. 결 론

태양광 패널 지붕에 설치하는 경우 강화된 단열을 통해 냉난방부하에 미치는 영향을 살펴보기 위해 아산 소재 공장을 연구 대상으로 하였다. 태양광 패널의 유무에 따른 하부 공간의 실내 온도 및 습도 변화를 측정하여 실내 열환경에 미치는 영향을 비교하였다. 동특성 해석 프로그램인 TRNSYS를 활용하여 태양광 패널 설치에 의한 냉난방 부하 변화량, 절감율을 산출하였으며 그 결론은 아래와 같다.

(1) 냉방 기간인 2019년 6월 25일부터 7월 2일까지 8일 동안 지붕에 태양광 패널이 설치된 하부 공간과 미설치된 하부 공간의 온도를 측정한 결과, 태양광 모듈이 설치된 공간의 온도는 미설치된 공간 대비 0.3~1.8℃ 낮았으며, 평균적으로는 0.6℃ 낮았다. 냉방시에는 단열성능 개선으로 실내 온도를 낮추어 주는 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

(2) 냉방시 실내 설정온도 설정값 24~28℃의 범위에 따라 냉방부하 변화를 TRNSYS 시뮬레이션으로 비교하면 단열 성능이 강화되므로 냉방부하는 평균 22 kW, 1.4%, 단위면적당 1.7 W/㎡ 절감된다. 실내 설정온도는 24℃일 때 절감량은 38 kW, 절감율은 2.1%로 가장 효과적이었다.

(3) 실내온도 설정값 20~24℃의 온도변화에 따라 난방부하 변화량을 비교하면 태양광발전 시스템 구축으로 지붕 단열 성능 개선 시 난방부하는 평균 130 kW, 3.3%, 단위면적당 10.0 W/㎡ 절감되어 태양광발전 패널 설치가 난방부하 절감에 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 실내 설정온도는 24℃일 때 절감량은 150 kW, 절감율은 3.4%로 가장 효과적이었다.

References

1. Ministry of Environment, 2019, Enforcement Decree of the Renewable Energy Act.
2. Shin, J. H., Kim, S. S., and Cho, Y. H., 2016, The Strengthening Effect of the Heating and Cooling Load on the Thermal Performance in the Housing Unit, Journal of the Korean Society of Living Environment System, Vol. 23 No. 1, pp. 104-112.
3. Venkiteswarana, V. K., Limana, J., and Alkaffa, S. A., 2017, Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Load, Energy Procedia, Vol. 142,

pp. 2689-2697.
4. Güneş, İ., 2015, Examination of Surface Tracking on Polyurethane Foam Insulators, Procedia Social and Behavioral Sciences, Vol. 195, pp. 2629-2633.
5. Choi, C. Y., Ko, S. C., and Kwak, H. Y., 2006, TRNSYS Dynamic Simulation for Solar Heating and Cooling Load Estimations, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 1, pp. 1-6.
6. Solar Energy Laboratory, 2005, TRNSYS Ver. 18, Multizone Building, University of Wisconsin-Madison, pp. 160-168.