[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 26, No. 1, 2006

수치 계산을 통한 다목적 BIPV 시스템의 운전방법에 관한 연구

김의종*, 김헌중*, 서승직**

*인하대학교 대학원 건축학부(kim_with_jesus@yahoo.com), (nicehj00@hotmail.com)
**인하대학교 건축학부 교수(energeti@inha.ac.kr)

A Study on the Operation Methods of Multipurpose BIPV System by Numerical Analysis

Kim, Eui-Jong*, Kim, Heon-Joong*, Suh, Seung-Jik**

*Dept. of Architecture, Graduate School, Inha University(kim_with_jesus@yahoo.com), (nicehj00@hotmail.com)
**Professor, Dep. of Architectural Engineering, Inha University (energeti@inha.ac.kr)

Abstract

The Multipurpose BIPV System(MBIPVS) was evaluated as an effective passive system through analyzing the thermal performance and the efficiency of PV power generation in the previous papers. To achieve the performance better, the operation method should be determined by considering physical conditions in each occasion. Thus, we choosed the reference operation methods in each season set by the overview of the meteorological data for last 6 years, In-choen, and compared them with the various alternatives that we had made up with for improving thermal performance. The results from adopting various alternatives on MBIPVS showed that the appropriate operational model would be effective to the energy savings ; we could reduce the total loads 1,051.0[kWh] in summer and 108.9[kWh] in winter.

Keywards : 다목적 BIPV 시스템(MBIPVS), 운전모드(Operation Mode), 부하계산(Load Calculation)

기 호 설 명

c : 비열(J/kg · K)
dt : 시간간격
F : 형태계수
H : 유동 공간의 폭
L : 대상모델의 길이

접수일자:2006년 1월 24일, 심사완료일자:2006년 3월 13일

M : PV Roof 개방 여부
S : 일사량 (W/㎡)
T : 온도(K)
v : 유속(m/s)
W : 대상 모델의 폭
x : 부재 격자 간격
Y : 유체의 격자간격
k : 열전도율 (W/m · K)
h_r : 복사 열전달 계수 (W/㎡ · K)
h_v : 대류 열전달 계수 (W/㎡ · K)
α : 흡수율
ρ : 밀도(kg/㎥)
τ : 투과율

하 첨 자

a : 지붕체 주변
out : 외부공간
m : 경량 금속체
f : 유체유동공간
s : PV Roof
r : 실내공간
g : 천정 유리
w : 벽체
o : 부재 외부면
i : 부재 내부면
j : 벽체의 방위
1…n : 절점(외부면 부터)
pv : PV Roof의 PV
v : 수직면

1. 서 론

오일 쇼크의 영향으로 에너지 문제가 전 세계적으로 인식되면서 전체 에너지 소비량 중 상당량의 비율을 차지하는 건물에서의 다양한 passive 기술들에 대한 연구가 활발히 이루어져왔다. 이는 최근 가속화된 에너지 이슈화와 관련하여 건물에서도 대체에너지의 활용 및 건축적 방법에 의한 자연형 설계기법을 적극적으로 도입함으로써 건물의 에너지 사용량을 줄이고 청정에너지원으로 변화시키려는 움직임으로 확산되고 있다.

이에 선행연구[1]에서 자연형 태양열 시스템 원리를 이용하여 지붕 외피를 통한 열적 성능 개선은 물론 실내의 균일한 조도분포와 태양에너지를 적극 활용할 수 있도록 다목적 외피 시스템(Multipurpose BIPV System 이하 MBIPVS라 한다.)을 제안하였으며 시스템 설계를 위한 다양한 정상상태 해석 및 PV면에서의 음영효과[2]등의 연구도 함께 이루어졌다.

본 연구에서는 MBIPVS의 계절별 가능한 운전방법에 대해 제안하고 이를 수치해석적으로 평가분석하기 위해 시스템의 각 절점에 대하여 열수지식을 작성하였으며 미분항이 포함된 열수지식의 분석을 위해 이산화 등의 수치해석 기법을 활용하여 프로그램을 작성하였다. 이를 이용하여 MBIPVS의 계절에 따른 다양한 운전방법 중 최적 운전방법을 도출하고자 하였다.

2. 시스템 개요

그림 1은 다양한 자연형 기법이 통합된 MBIPVS의 개념도를 나타낸 것으로 PV를 통한 전력 생산, 경량 방사체를 이용한 야간 복사냉각, 천정 외피를 유리로 사용한 자연형 채광, 중공층의 가열공기를 이용하는 집열기 등의 기능이 적용된 시스템이다.

1) 김의종 외, 집열장치와 PV를 통합한 가변 지붕 시스템, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 제 24권 2호, 2004.
2) 김의종 외, 지붕 일체형 태양광 발전 시스템의 응용에 관한 연구 -시스템의 최적길이비 산정을 중심으로-, 한국태양에너지학회 논문집, 제 25권 2호, 2005.

이러한 복합시스템의 각 설계인자들은 운용모드에 따라서 서로 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 각 계절별로 가능한 운전 모드를 제시하고 설계 인자별로 배타적인 경우 성능비교를 통하여 운전모드를 제시하였다.

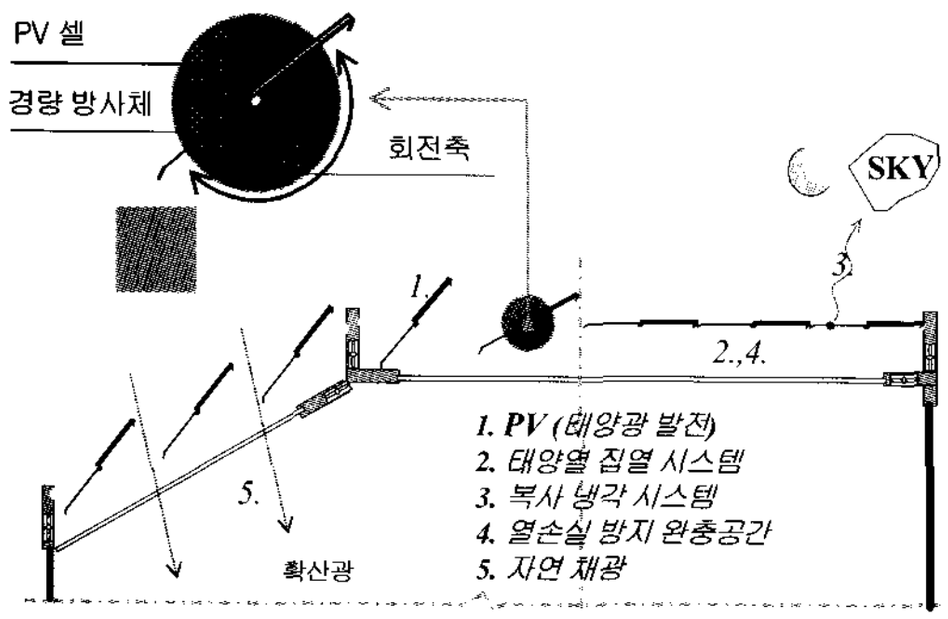

그림 1. MBIPVS의 개념도

3. 시스템 해석

3.1 수치해석

열수지식은 각 제어체적별 flux가 보존되는 유한체적법(FVM)에 의해 표현하였으며 방위별 벽체는 확산수, 유체의 흐름은 Courant수 안정조건을 만족하는 범위로 계산격자를 구분하여 계산하였고 바닥면은 실내온도와 같다고 가정하였다.

계산 scheme은 수치안정성과 계산오차에 있어 상대적으로 우수한 Crank-Nicolson법을 사용하였다. 매트릭스 해법은 Gauss-Seidel 반복해법을 이용하여 $\varepsilon < 10^{-3}$일 때 수렴조건으로 하였으며 프로그램은 FORTRAN으로 작성하였다.

3.2 열수지 해석 개요

MBIPVS의 비정상상태 해석을 위해서 식(1)~(11)과 같이 각 절점에 해당하는 열평형 방정식을 작성하였으며 열전달은 각 벽체 수직방향으로의 1차원으로 가정하였다. **그림 2**는 비정상상태 열수지모델의 개념을 나타낸 것이다.

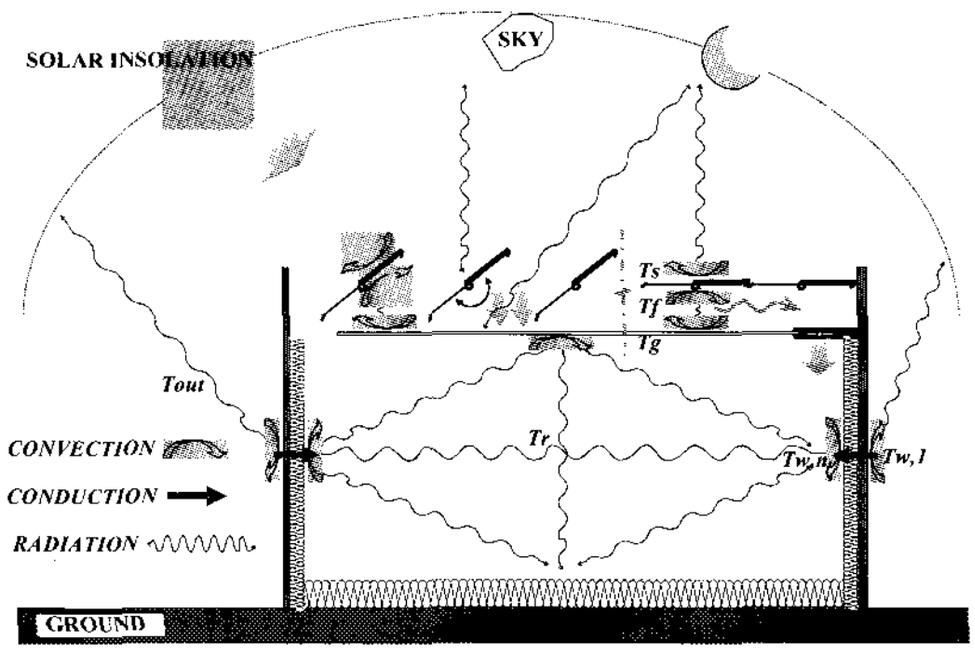

그림 2. MBIPVS의 대상건물 및 열수지 모델

① PV Roof (metallic)

$$c_m \rho_m L_m \frac{dT_m}{dt} = h_{va}(T_{out} - T_m) + h_{vf}(T_f - T_m) + F \cdot h_{rs}(T_{sky} - T_m) + h_{rsg}(T_g - T_m) + \alpha S_{tilt} \quad (1)$$

② PV Roof (PV covered)

$$\tau\alpha_{pv} S_{tilt} = \eta_p S_{tilt} + h_{va}(T_{pv} - T_{out}) + h_{vf}(T_{pv} - T_f) + h_{rs}(T_{pv} - T_{sky}) + h_{rsg}(T_{pv} - T_{g,o}) \quad (2)$$

③ 유체 유동 공간(중공층)

$$c_f \rho_f H \frac{dT_f}{dt_2} = h_{vf}(T_s - T_f) + h_{vf}(T_g - T_f) + c_f \rho_f \frac{v_f}{\Delta Y} H(T_{f-1} - T_f) \quad (3)$$

④ 천정 유리면 외부

$$c_g \rho_g L_g \frac{dT_{g,o}}{dt} = h_{vf}(T_f - T_{g,o}) + h_{rsg}(T_s - T_{g,o}) + U(T_{g,i} - T_{g,o}) + (1-M) \cdot F \cdot \alpha_r \cdot S_{dif} + (1-M) \cdot F \cdot h_{rg}(T_{sky} - T_{g,o}) \quad (4)$$

⑤ 천정 유리면 내부

$$c_g\rho_g L_g\frac{dT_{g,i}}{dt}=h_{v,r}(T_r-T_{g,i})+U(T_{g,o}-T_{g,i})+\sum_{j=1}^{5}h_{rj}(T_{w,jn}-T_{g,i}) \quad (5)$$

⑥ 벽체 외표면

$$c_{w,j1}\rho_{w,j1}0.5dx_1\frac{dT_{w,j1}}{dt}=h_{va}(T_{out}-T_{w,j1})+h_{rwj}(T_{sky}-T_{w,j1})+\frac{k_1}{dx_1}(T_{w,j2}-T_{w,j1})+\alpha_j\cdot S_{vj} \quad (6)$$

⑦ 벽체내부

$$(0.5c_{w,ji-1}\rho_{w,ji-1}dx_{i-1}+0.5c_{w,ji-1+1}\rho_{w,ji}dx_i)\times\frac{\partial T_{w,ji}}{\partial t}=\frac{k_{i-1}}{dx_{i-1}}(T_{w,ji-1}-T_{w,ji})+\frac{k_i}{dx_i}(T_{w,ji+1}-T_{w,ji}) \quad (7)$$

⑧ 벽체 내표면

$$c_{w,jn}\rho_{w,jn}0.5dx_{n-1}\frac{dT_{w,jn}}{dt}=h_{vr}(T_r-T_{w,jn})+\frac{k_{n-1}}{dx_{n-1}}(T_{w,jn-1}-T_{w,jn})+\sum_{j=1}^{5}h_{rj}(T_{w,j^*n}-T_{w,jn}) \quad (8)$$

⑨ 바닥면 온도

$$T_{floor}=T_r \quad (9)$$

⑩ 실내 온도

$$c_f\rho_f V_f\frac{dT_r}{dt}=\sum_{j=1}^{6}h_{vr}A_j(T_j-T_r)+Q_{sol}+Q_{in}+\dot{Q}_{ven}+\dot{m}\cdot c_f\cdot(T_f-T_r)+\dot{Q}_{load} \quad (10)$$

⑪ 냉난방 부하 (식(10)으로부터)

$$\sum\dot{Q}_{load}=cM(T_{set}-T_r) \quad (11)$$

3.3 물성치 및 설정조건

표 1과 표 2는 시뮬레이션에 필요한 입력 조건 및 물성치를 나타낸 것으로 전체 복합 외피 시스템(MBIPVS)의 길이비(지붕방사체 : PV모듈)는 1:1로 설정하였다.

표 1. 프로그램 설정 조건

설정조건	내 용		비 고
room size	4×4×3 (W×L×H)		수직벽 무창
fan flowrate	0.2㎥/s		per 1m(width)
기상데이터	2004년 인천 기상청		위도 37.28°
	태양정수 1353W/㎡		
PV	η_r (%)	13.0	Mono-Si type
	NOTC(℃)	45	
	β_p (%/℃)	0.40	

표 2. 각 벽체 및 시스템의 물성치

구 분		열전도율 (W/mK)	비열 (J/kgK)	밀도 (kg/㎥)	두께 (mm)	방사율
지붕	경량금속	177	875.00	2770	5	0.8
	유 리	1.4	753.00	2540	4	0.9
	이중유리	U-value	1.4 (charge of Argon)			
		composition	4 / 16 / 4 (glass/Argon/glass)			
벽체	콘크리트	1.5119	795.49	2400	200	0.8
	단열재	0.034	837.36	100	25	
유체	공 기	0.022	1004.83	1.3	200	

4. MBIPVS의 운전방법

4.1 계절의 설정

PV의 경사각 및 음영 등 태양기하학에 의존하는 성분들의 운전기간에 따른 분석을 위해 **그림 3**과 같이 인천의 최근 6년간(1999-2004)의 기

상청 데이터를 가지고 설정온도에 따른 외기최대온도의 빈도수를 표시하였다. 난방기의 경우 설정온도를 20℃로 가정할 경우 외기최고온도가 설정온도를 넘어서지 않는 부분에서 난방기를 가동하는 것으로 하였으며 냉방기는 난방기에 비해 연중 빈도수의 추이가 뚜렷하지 않아 설정온도가 24℃일 때 외기최고온도가 설정온도를 넘어서는 빈도수가 6년간(1999-2004) 같은 일자에 5회 이상인 기간을 기준으로 설정하였으며 이 외의 기간을 중간기로 보았다. **표 3**은 위와 같은 과정을 통해 설정된 각 기간을 정리한 것이다.

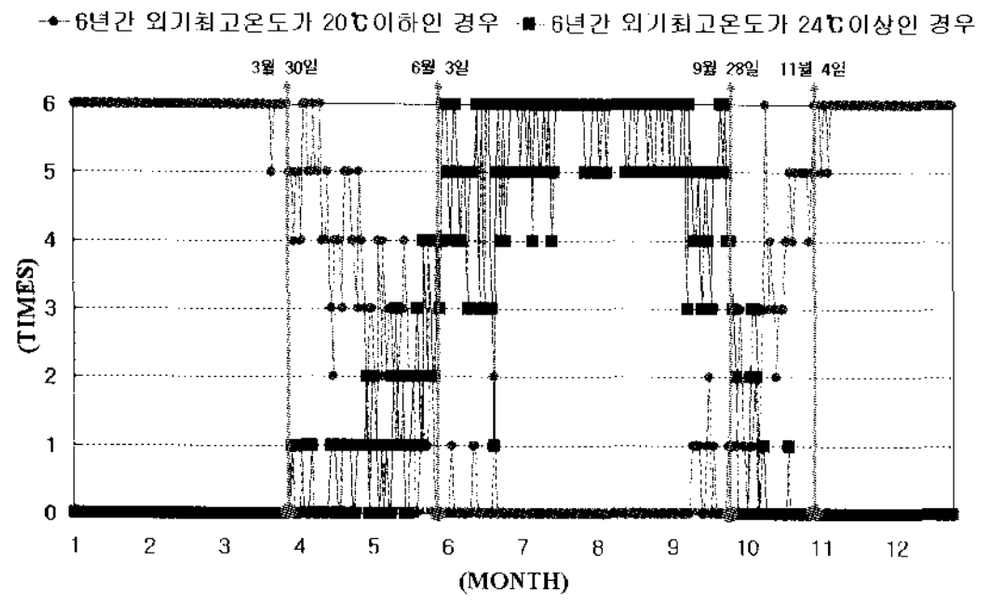

그림 3. 외기 최대온도의 설정온도별 빈도수

표 3. 냉난방 기간의 설정

	냉 방 기	난 방 기	중 간 기
기 간	6. 3 ~ 9. 28	11. 4 ~ 3. 30	그 외
설정온도	24℃	20℃	22℃
총 시 간	2832 hr	3528 hr	2400 hr

4.2 계절별 운전방법

다양한 자연형 기법이 통합된 MBIPVS는 각 계절별, 주야간별로 효율적인 운전방법이 요구된다. **표 4**는 설정된 냉난방기간에 따른 운전모드를 나타낸 것이다.

난방기의 경우 PV Roof의 개방시 외기와의 직접 접촉으로 인한 열손실로 인해 부하가 증가할 수 있으나 경사지게 운용되는 PV Roof는 보다 많은 PV 발전량을 기대할 수 있는 측면도 함께 가지고 있다. **표 5**는 이와 같은 배타적인 조건이 함께 존재하는 MBIPVS의 대안을 선정하여 계산을 통해 실부하량 등을 비교 분석하기 위해 제시한 조건이다. 본 논문에서의 대안비교를 위한 난방기의 기준모델은 주간에는 PV 최적경사로 개방, 야간에는 열손실을 줄이기 위해 밀폐하는 방식을 택하였다.

표 4. MBIPVS의 기준모델 운용모드

	설계인자	운용모드	설 정 조 건	
냉방기	PV Power Generation	PV Roof 개방	PV 최적경사	주간
	Radiative Cooling	PV Roof 밀폐	$T_f < T_{set}$	야 간
난방기	PV Power Generation	PV Roof 개방	PV 최적경사	주 간
			Solar Collector	야 간
	Solar collector	PV Roof 밀폐	실내유입 (fan)	$T_f \geq T_{set}$
			buffer space	야 간

표 5. 대안선정 조건

	대안	설정조건	조건	기타조건	운용모드
냉방기	Alt.1	$T_{out} \geq 30℃$	밀폐 및 실외배기	Alt.1,2,3 이외조건	경사각
	Alt.2	$T_{out} \geq T_{set}$			
난방기	Alt.3	$T_{out} \leq 0℃$	밀폐 및 태양열 이용	Alt.1,2,3 이외조건	경사각
	Alt.4	$T_{out} \leq 5℃$			
	Alt.5	$T_{out} \leq 10℃$			

5. 결과 및 분석

5.1 PV Roof 경사면 일사량

각 계절별 PV Roof에 생기는 음영을 고려하여 각도별 누적최대일사량을 확인하였다. **그림 4**를 통해 알 수 있듯이 여름철의 경우는 높은 태양고도로 인해 인접 PV Roof로 인한 음영의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 난방기의 경우는 **그림 5**와 같이 음영을 고려하지 않을 시 경사각에 따라 음영을 고려할 경우와 상당한 격차를 보인다. 특히 음영을 고려하면 인접 PV Roof의 영

향으로 인해서 경사각이 45°~50°일 때 가장 많은 누적일사량 값을 보이게 된다. 따라서 본 연구에서 PV Roof를 계절별 고정각도라고 가정하여 냉방기는 20°, 난방기는 45°로 하여 시뮬레이션을 진행하였다.

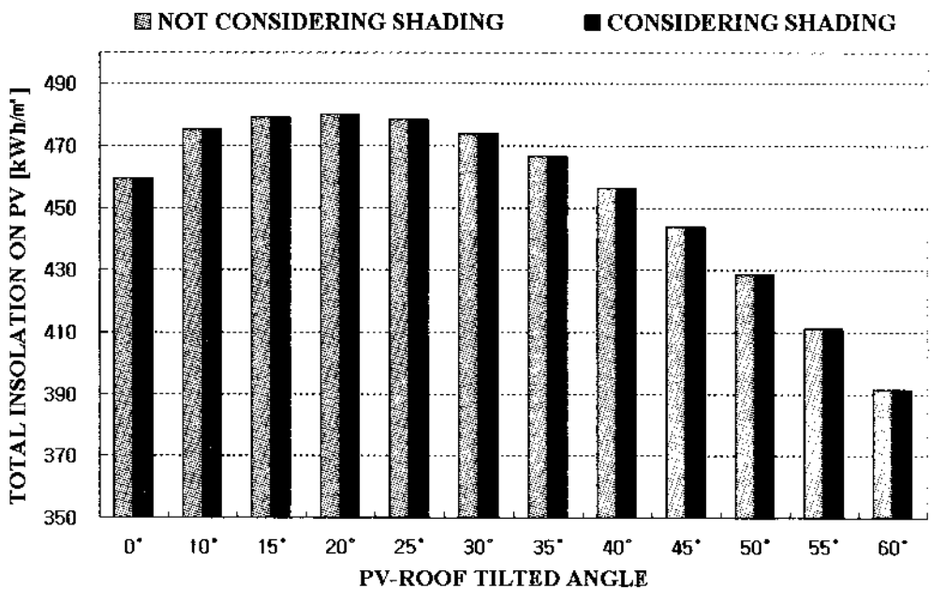

그림 4. 경사에 따른 냉방기 PV-ROOF 일사량

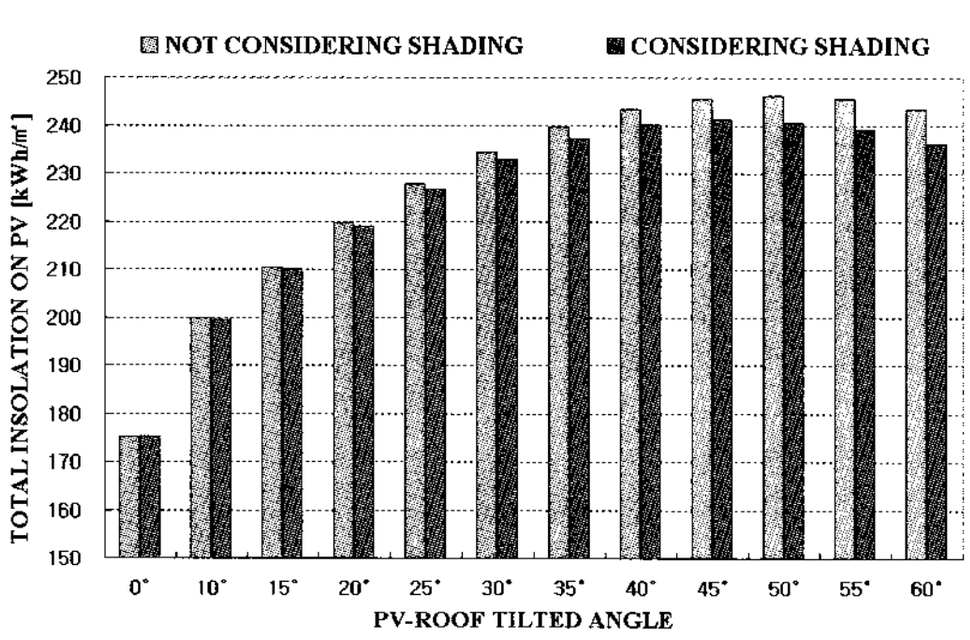

그림 5. 경사에 따른 난방기 PV-ROOF 일사량

5.2 대안분석

그림 6은 여름철 주간을 최적경사로 고정시킨 상태인 기준모델과 외기온도에 따른 열취득을 막기 위해 제안된 모델과의 냉방부하 및 피크부하를 비교한 것이다. Alt.1의 경우는 외기온도가 30℃보다 높은 혹서기 때 천정 유리면을 통한 열취득을 막기 위해 PV Roof를 닫고 fan을 이용하여 후면 배기시킨 경우이며 Alt.2는 외기온도가 설정온도(T_{set})보다 높은 경우에 한하여 Alt.1과 같은 방법을 적용한 것이다.

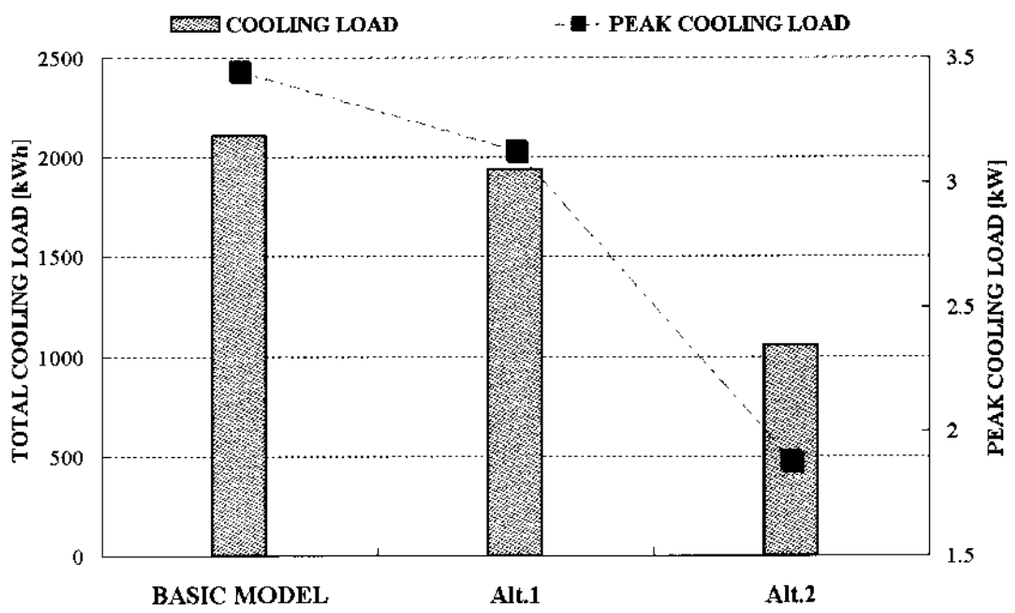

그림 6. 여름철 대안별 냉방부하 및 피크부하

냉방부하의 측면에서 MBIPVS의 제어를 통해 Alt.2의 경우 기준모델에 비해 약 1,051.0[kWh]의 부하절감 효과를 나타내었으며 피크부하의 경우도 약 1.5[kW]를 줄일 수 있기 때문에 MBIPVS의 제어모델에 따라 기계용량산정에 있어서 큰 효과를 기대할 수 있을 거라 사료된다.

그림 7은 냉방시 제어모델과 마찬가지로 난방기 주간 실외온도가 0℃(Alt.3), 5℃(Alt.4), 10℃(Alt.5) 이하 일 때 주변으로의 열손실을 막기 위해 PV Roof를 닫음으로 실내간의 중공층을 형성하고 아울러 중공층의 온도가 실내온도보다 높을 때 fan을 통하여 실내로 가열된 공기를 유입시키는 제어모델일 때의 난방부하를 나타낸 것이다.

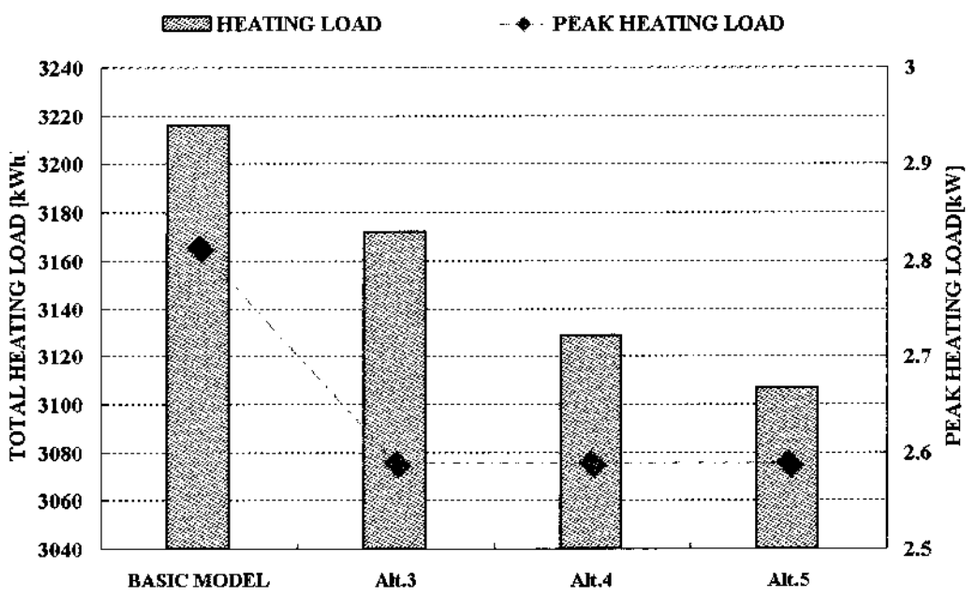

그림 7. 겨울철 대안별 난방부하 및 피크부하

Alt.5의 경우 PV 최적 발전에 맞추어진 기준모델과 비교하여 볼 때 약 108.9[kWh]의 난방

부하 절감효과를 나타내고 224.8[W]의 피크부하를 줄일 수 있을 것으로 계산되었지만 Alt.3과 Alt.4와 비교하였을 때는 피크부하의 감소가 일어나지 않는 것은 피크부하가 일어나는 시점이 외기온도가 0℃이하인 기간 중이기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

이상으로 수치해석을 이용하여 MBIPVS의 계절별 운전방법에 대해 평가하고 최적의 운전방법을 조사하였다. 효율적인 운전방법을 통하여 냉난방기 동안의 부하절감효과를 확인 할 수 있었으며 이를 통하여 자연형 시스템을 적용한 건물에서의 기계 용량의 산정과 시스템 운용방법의 중요성 등을 함께 확인할 수 있었다. 아울러 이 결과를 바탕으로 보다 효율적인 운전방법을 위한 연구가 계속될 예정이다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 인천지역 기상청의 최근 6년간의 자료를 통한 설정온도 기준 빈도수를 가지고 계절을 설정하였으며 냉방기 6월3일~9월28일, 난방기는 11월4일~3월30일 그리고 이외의 기간을 중간기로 보았다.

② 음영을 고려한 경사면의 총합일사량 분석에서 냉방기에는 경사각을 20°(480.223 [kWh/㎡]), 난방기동안에는 경사각을 45°(241.153 [kWh/㎡])로 유지하는 것이 가장 일사를 많이 받는 것으로 계산되었다.

④ 다양한 대안 모델들을 통하여 부하량 및 피크부하 절감을 기대할 수 있었다. 특히 냉방기의 경우 $T_{out} \geq T_{set}$일 때 PV Roof를 닫고 가열공기를 외기로 배출시키는 Alt.2에서 기준 운전 방법에 비해 약 1,051.0 [kWh]의 부하절감과 1.5[kW]의 피크부하를 절감할 수 있었으며 난방기의 경우는 $T_{out} \leq 10℃$일 때 PV Roof를 닫고 시스템을 집열시스템으로 이용하는 Alt.5에서 약 108.9[kWh]의 부하절감과 224.8[W]의 피크부하 절감효과를 기대할 수 있었다.

후 기

이 논문은 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. K.S. Ong, A mathematical model of a solar chimney, Renewable Energy Vol 28, No 7, pp 1047~1060. 2003.
2. Baruch Givoni, Passive and low energy cooling of buildings, Van Nostrand Reinhold, 1994.
3. A.K. Athienitis, M Sntamouris, Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings, James & James, 2002.
4. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Heat and Mass Transfer, 5th ed. John Wiley & Sons, 2002..
5. 윤종호, 김병수, 인접차폐물에 의한 건물일체 태양광발전 모듈의 음영 및 발전 성능 연구, 대한건축학회논문집 21권 7호, 2005. 7
6. 김의종 외, 집열장치와 PV를 통합한 가변 지붕 시스템, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 제 24권 2호, 2004.
7. 김의종, 최원기, 서승직, 지붕 일체형 태양광 발전 시스템의 응용에 관한 연구(시스템 최적 길이비 산정을 중심으로), 한국태양에너지학회논문집 25권 2호, 2005.
8. 이승복, 원종서, 이중외피와 할로우 코어를 적용한 초고층 주거건물의 에너지 절감 방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집 21권 3호, 2005. 3