

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 1, 2007

# 건물 적용을 위한 태양열 집열기 기능을 갖는 BIPV 시스템의 기초적 연구

민성혜\*, 서승직\*\*

\*인하대학교 대학원 건축공학과 (hannah4jesus@gmail.com),

\*\*인하대학교 건축학부 교수 (energeti@inha.ac.kr)

## A Fundamental Study of BIPV System Functioned as Solar Collector for Building Application

Min, Sung-Hye\*, Suh, Seung-Jik\*\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, Inha University (hannah4jesus@gmail.com),

\*\*Dept. of Architecture, Inha University (energeti@inha.ac.kr)

### Abstract

Perimeter zone is one of the weakest area in buildings and it makes an increase of heating and cooling loads, in addition to condensation or discomfort with cold-draft to residents in winter. Because of this, it needs to be reinforced by active systems. However, they use fossil fuel, and ultimately greenhouse effect is urged. Thus, we proposed BIPV system functioned as solar collector which can substitute active system. As a fundamental stage, heat balance equation in steady-state by Fortran was used not only, in winter, for pre-heating effect and electric power capacity during the day, but also in summer, for the latter during the day and sky radiation effect during the night. Especially, we should have considered shading on PV by IES SunCast, since even a little bit of it makes the efficiency too low for the PV modules to work. As a result, in summer day, the PV panel should be tilted in 70 degrees to gain the most electric power. Moreover, we could verify that this model makes higher temperature and heat flux under 0.02 m/s.. On the other hand, the PV had the high efficiency with high velocity because of cooling effect behind the PV. Therefore, we should regard the air current distribution later on.

**Keywords** : 건물 일체형 태양광 발전 시스템 (BIPV System), 태양열 집열기 (Solar Collector), 외주부 (Perimeter Zone), 열평형 방정식 (Heat Balance Equation), 발코니(Balcony), 음영(Shading)

접수일자:2007년 2월 22일, 심사완료일자:2007년 3월 21일

## 기 호 설 명

$C_p$	: 공기의 비열 [J/kgK]		
$E_{pv}$	: PV 발전량 [ $W/m^2$ ]		
$hr$	: 복사 열전달 계수 [ $W/m^2K$ ]		
$hw$	: 대류 열전달 계수 [ $W/m^2K$ ]		
$m$	: 질량유량 [kg/s]		
$q$	: 열에너지량 [W]		
$S$	: 일사량 [ $W/m^2$ ]		
$T_{am}$	: 온도 [K]		
$T_{am}$	외기	$T_{co}$	집열관
$T_f$	채널 내 유체	$T_{gl}$	유리
$T_{ol}$	채널의 출구 유체	$T_{pv}$	PV 모듈
$T_{sky}$	천공	$T_w$	벽체

## 1. 서 론

최근 발코니 확장 법안이 통과함에 따라 많은 공동주택과 아파트 입주자들이 발코니를 없애고 실내를 확장 하고 있다. 이는 Buffer Zone을 없애고 실내를 외부 환경에 더욱 노출시킨다. 이는 화재 위험은 차치하더라도 고층건물들은 외피 경량화로 인해 단열성능이 떨어져 냉난방부하를 증가시킬 뿐 아니라 특히 겨울철에는 결로현상과 Cold Draft 등으로 의해서 재실자들에게 불쾌감을 준다.

### 1.1 연구목적

공동주택의 경우 아직 특별한 대책이 없는 실정이며 이와 같은 외주부(Perimeter Zone) 환경 개선을 위해서는 설비적 시스템의 설치가 필요하다. 하지만 이는 화석에너지를 더 많이 소비하는 방법으로서 지구온난화의 주범인 이산화탄소를 더욱 증가시킨다. 따라서 본 연구는 이러한 설비를 대신할 목적으로 자연에너지 이용이 가능한 건축적 방법의 BIPV시스템을 제안하고 시스템의 건물 응용을 위한 기본 연구를 수행하였다. 이 시스템의 특징은 태양열집열기 기능을 갖고 있으며 본 연구에서는 계절별 주 야간 운영에 따른 시스템 설계와 성능에 관련하여 기본 연구를 수행하였다. 따라서 이와 같은 시스템의 개발과 응용은 친환경 건축을 실현하

는 유일한 방법으로써 건물적용을 위한 연구를 수행하였다.

### 1.2 연구방법

본 시스템의 겨울 주간 운영 방법에서 열적 효과와 PV 발전량을 산정하고 여름 야간 운영방법에서는 천공복사에 의한 열적 효과를 검토하기 위해 Compaq Visual Fortran 6에서 Fortran 언어로 코딩하여 정상 상태로 각 운영 모드별 분석을 하였다. 또한, 여름 주간에 PV 발전량을 극대화하기 위해서 IES-VE의 Suncast로 음영분석을 한 후 실제 일사량 데이터를 적용하여 음영을 제외한 시간에서의 효과를 분석하였다.

## 2. 시스템 개요

본 시스템은 PV와 태양열 집열기를 남측면 외피에 그리고 루버를 창면에 통합시킨 자연형 시스템으로써, 각 계절, 주야간별 운영방법의 개념은 그림 1과 같고 다음의 효과를 기대한다.

- (1) 태양광발전 (PV) - 주간
- (2) 태양열 (집열관) - 겨울철 주간
- (3) 천공복사냉각 - 여름철 야간
- (4) 이중외피 - 야간 (밀폐 공간)
- (5) 실내 태양광 유입 조절 - 주간 (루버조절)
- (6) 심미적 효과 - 재료특성 및 운영별 변화

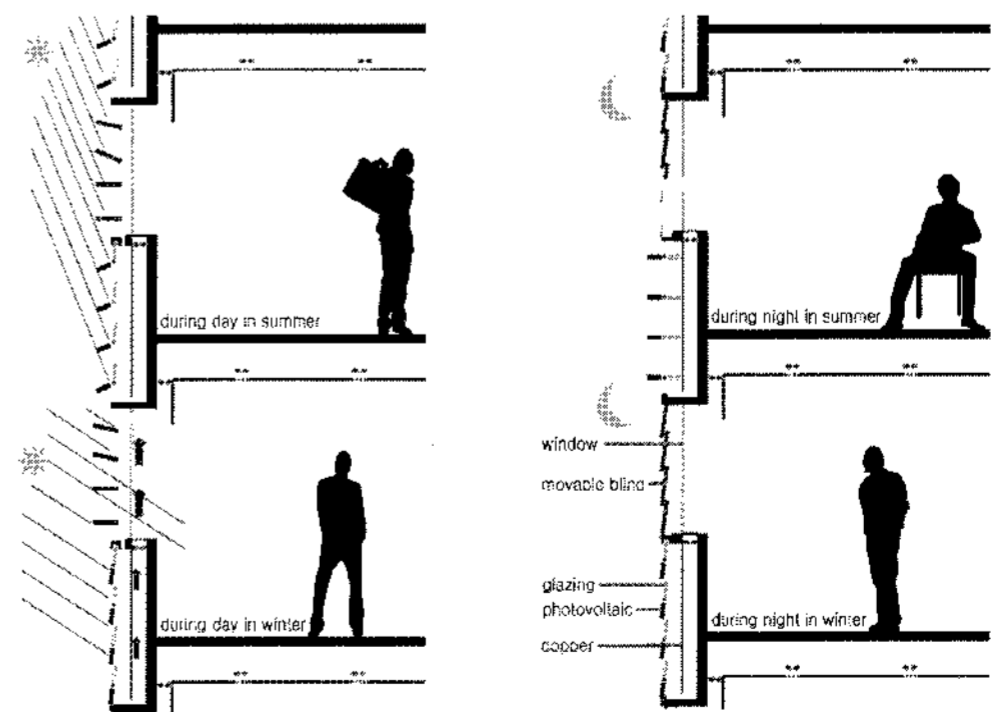


그림 1. 계절별 운영모드에 대한 개념도

### 3. 이론해석

#### 3.1 기본 모델

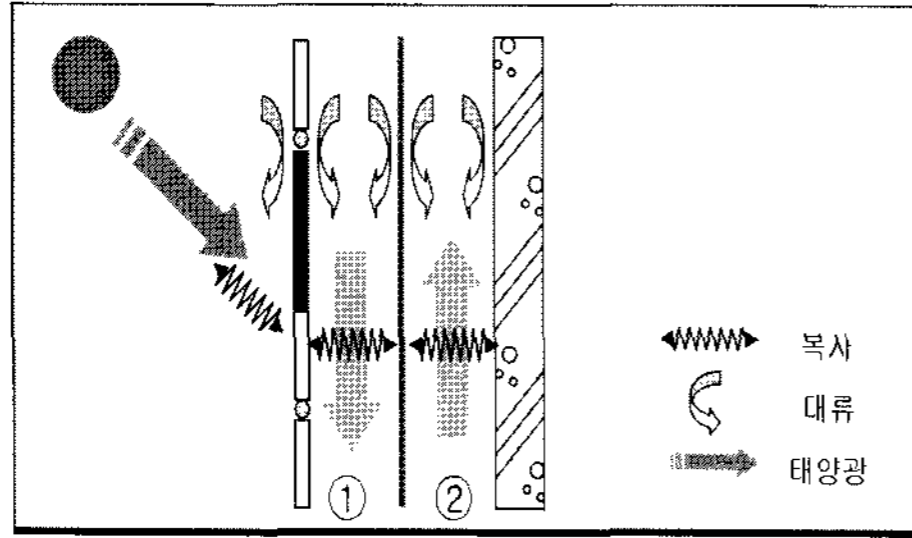


그림 2. 기본 모델 (겨울철 주간)

그림 2는 본 시스템의 겨울철 주간시 정상상태의 열평형 방정식을 위한 열수지 모델이다.

#### 3.2 시뮬레이션 조건

표 1. 시뮬레이션 환경 조건

	겨울	여름
기간	11월 - 2월	6월 - 8월
외기온 (°C)	0	25
풍속 $v_o$ (m/s)	2	2
유체 입구 온도	외기온	외기온
일사량 ( $W/m^2$ )	2004년 인천광역시 일사량 자료	

표 2. PV 성능표

	$\eta_r$ (%)	NOTC (°C)	$\beta_p$ (%, °C)
Mono-Si	13.0	45	0.40

$\eta_r$  : 표준 온도 시 PV 모듈의 효율  
 NOTC : 일반 발전 시 Cell 온도  
 $\beta_p$  : 온도 변수

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_{pv} + T_r)], T_r = 25^\circ C \quad (1)$$

PV 발전량을 산정하기 위해 설정한 PV 모듈은 Mono-Si 로써 표 2와 같고, PV의 실효율( $\eta_p$ )은 식 (1)로 산정했다. 시스템 크기는 가로(L) 1.2m, 높이(H) 1.8m, 채널 폭(W) 0.2m이다.

#### 3.3 시뮬레이션의 기본가정

- (1) 외피온도는 산술평균값을 사용한다.
- (2) 외피와 집열면의 세로방향 열전달은 없다.
- (3) 벽체 통한 실내 열전달은 없다고 본다.
- (4) 유체의 입구와 출구 사이 3:1되는 지점의 온도를 유체의 평균 온도로 사용한다.

#### 3.4 에너지 평형 방정식

$$\tau\alpha_p S = \eta_p S + hv_o(T_{pv} - T_{am}) + hv_{f1}(T_{pv} - T_{f1}) + hr_{pvam}(T_{pv} - T_{sky}) + hr_{pvco}(T_{pv} - T_{co}) \quad (2)$$

$$\alpha_g S = hv_{out}(T_{gl} - T_{am}) + hv_{f1}(T_{gl} - T_{am}) + hr_{glam}(T_{gl} - T_{sky}) + hr_{glco}(T_{gl} - T_{co}) \quad (3)$$

PV 모듈에 들어온 일사량은 식 (2), 유리면에 들어온 일사량은 식 (3)와 같이 열교환 한다.

$$T_{av} = (T_{pv} + 2T_{gl})/3 \quad (4)$$

유리와 PV로 이루어진 외피면의 온도는 식 (4)으로 산정하였다.

$$\tau_{gl}\alpha_{co} S = hv_{f1}(T_{co} - T_{f1}) + hv_{f2}(T_{co} - T_{f2}) + hr_{cow}(T_{co} - T_w) + hr_{copvgl}(T_{co} - T_{av}) \quad (5)$$

유리를 투과한 일사는 집열판에 흡수되고 이 에너지는 식 (5)와 같이 주변과 열교환 한다.

$$C_p m (T_{oil} - T_{am}) / (L \cdot H) = hv_{f1}(T_{av} - T_{f1}) + hv_{f1}(T_{co} - T_{f1}) \quad (6)$$

$$C_p m (T_{o2} - T_{o1}) / (L \cdot H) = hv_{f2} (T_{\infty} - T_{f2}) + hv_{f2} (T_w - T_{f2}) \quad (7)$$

채널안의 유체가 얻은 에너지는 대류 열교환 한 것과 같으므로 식(6), (7)과 같다.

채널 안 유체는 Hirunalabh et al<sup>4)</sup>이 제안한 완전한 흐름(fully developed flow)으로 가정했다.

### 3.5 각종 변수

(1) 외부 대류 열전달 계수 [W/m<sup>2</sup>K]

$$hv_{out} = 5.7 + 3.8v_{out} \quad (8)$$

McAdams<sup>5)</sup>이 제안한 식 (10)을 사용하였다.

(2) 유체의 대류 열전달 계수 [W/m<sup>2</sup>K]

$$hv_f = \frac{k}{H} \cdot Nu \quad (9)$$

(3) 천공온도

$$T_{sky} = 0.0522 \times T_{out}^{1.5} \quad (10)$$

Swinbank<sup>6)</sup>이 제안한 식 (12)을 사용했다.

(4) 열에너지량과 PV모듈에 의한 발전량

$$q = C_f \cdot m \cdot (T_{o2} - T_{am}) \quad (11)$$

$$E_{pv} = \eta_p \cdot S \cdot L \cdot (H/3) \quad (12)$$

식 (13)의 q는 겨울 주간에 본 시스템을 통과한 유체가 얻은 열에너지량이고, 식 (14)에서 E<sub>pv</sub>는 주간에 일사량 세기에 따라 얻을 수 있는 전기에너지량이다.

(5) 효율

$$\eta_1 = \frac{q}{S \cdot L \cdot H} \quad (13)$$

$$\eta_2 = \frac{q + (E_{pv})}{S \cdot L \cdot H} \quad (14)$$

식 (15)는 수급 일사에 대한 열에너지의 효율이고, 식 (16)은 시스템에서 유체가 얻은 열에너지와 PV발전량의 합에 대한 효율이다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 여름철 주간 운영 시

PV 모듈(Module)의 경우 직렬연결 된 셀(Cell)들 중에서 하나라도 그림자가 생길 경우 그 효율이 크게 줄어들기에 IES-VE SunCast를 이용하여 각 시간별 그림자를 먼저 분석하였다.

기존 모델, 즉 PV 모듈 간의 간격(이 후 Gap이라 함)이 0.45m인 모델을 분석한 결과, 음영시간이 많아 총 일사량에 비해 수급가능한 일사량이 매우 적음을 볼 수 있다.(그림 3)

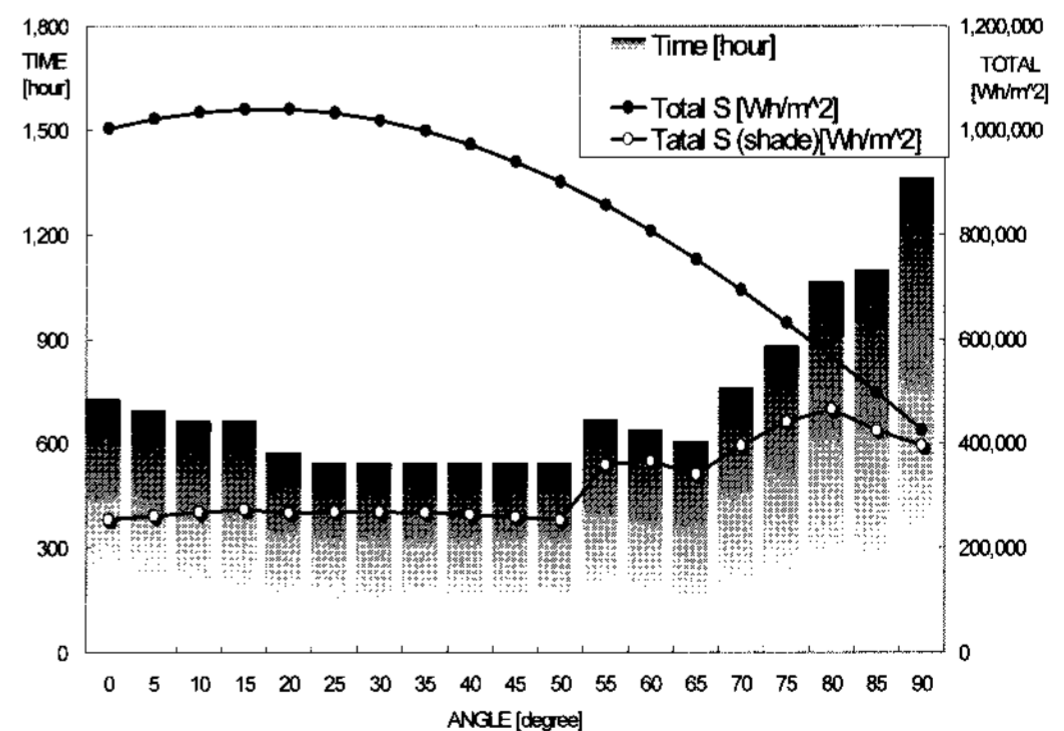


그림 3. Gap=0.45m에서 음영 외 시간의 일사량

따라서 기존 디자인에서 더 나은 효과를 위하여

그림 4의 오른쪽 디자인으로 수정하였다. 수정안은 PV간의 간격을 조정하여 모듈을 4개에서 3개로 하였다.



그림 4. 여름 주간 운용모드에서 기존안(좌)과 수정안(우)

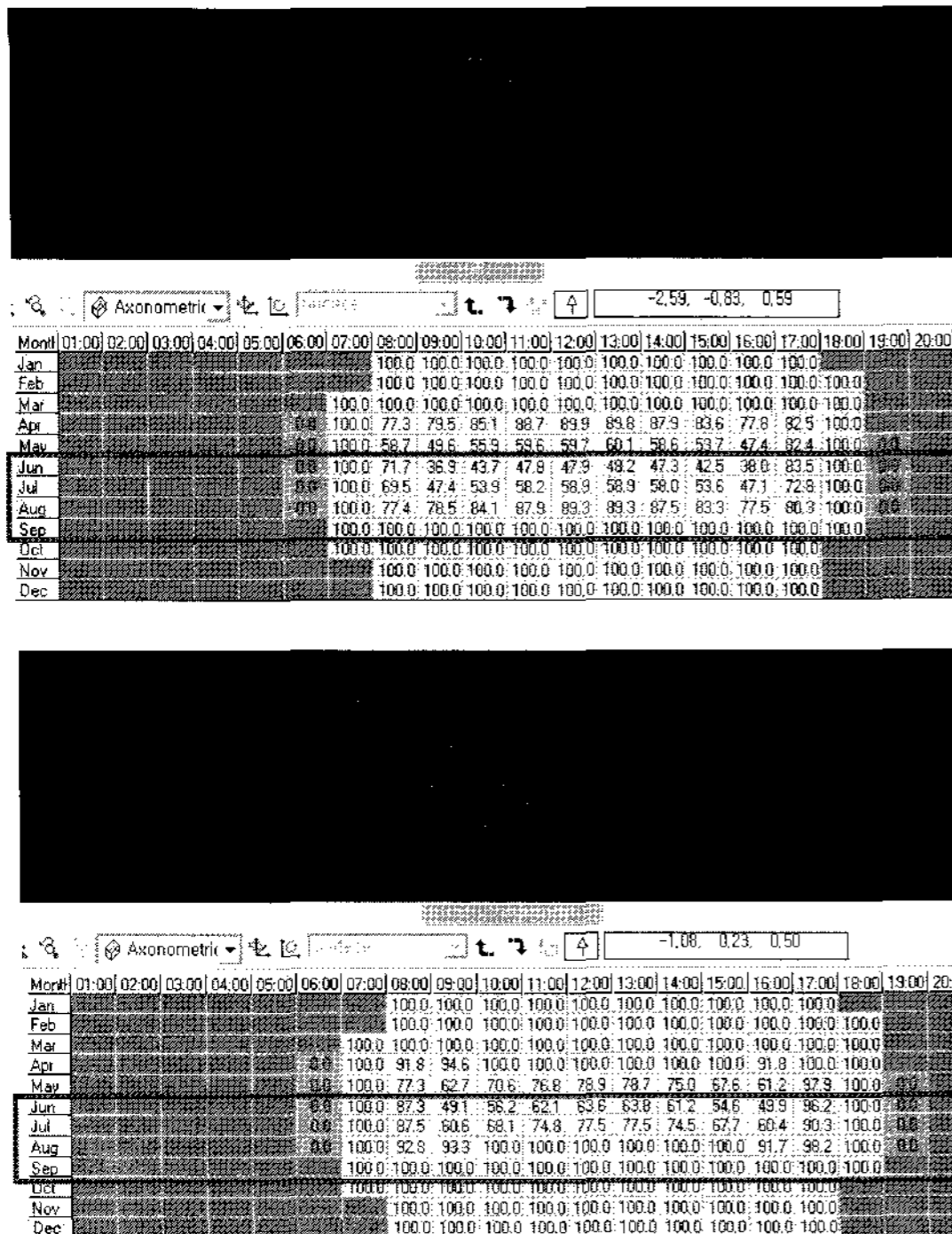


그림 5. 기존안(상)과 수정안(하)의 PV모듈 면적에 대한 일사면적 비율의 예 (경사각 25도)

또한, 그림 5는 기존안과 수정안 간의 PV 모듈의 면적에 대하여 일사를 받는 면적의 비율을 각 달의 21일 기준으로 비교하고 있다. Gap=0.45m에서 보다 Gap=0.58m에서 음영이 지지 않는 시간이 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

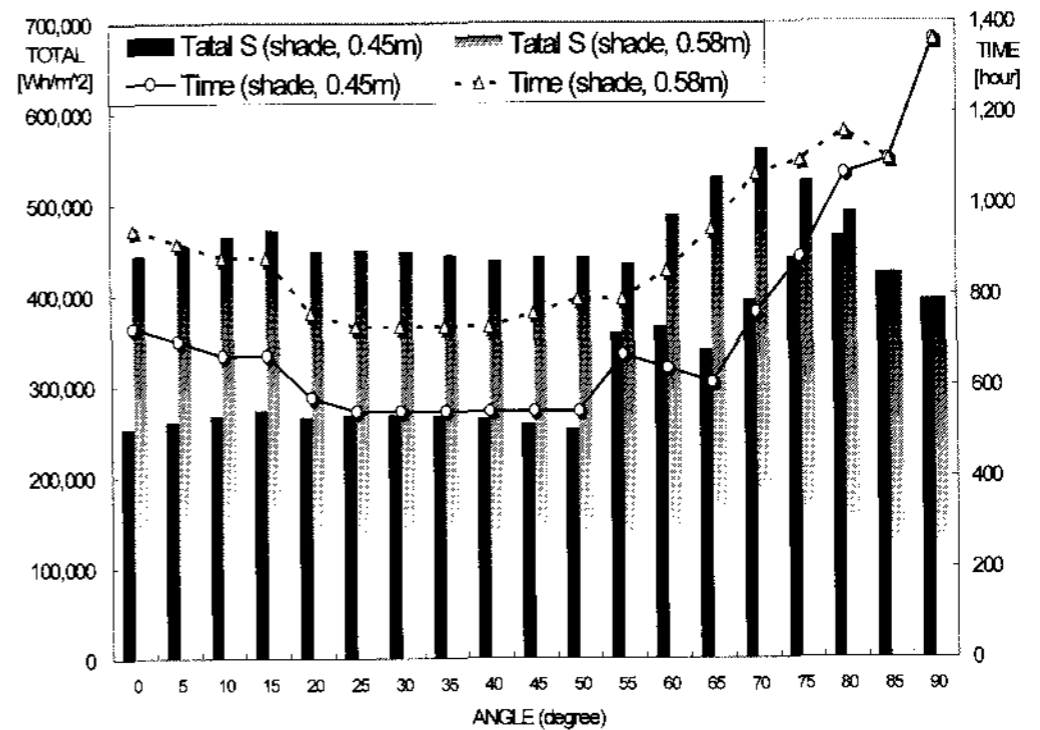


그림 6. Gap=0.45m모델과 Gap=0.58m모델 간 비교

그림 5는 각도에 따른 일사량, 음영이 없는 시간, 그리고 그에 따른 일사량의 변화를 비교하고 있다. 태양고도의 범선 기울기에서 일사의 세기가 가장 크기에 약 30도 내외에서 결과를 기대할 수 있지만, 위 그래프에서 보듯 30 ~ 60도에서 음영이 많아 70도가 최적 수급각임을 알 수 있다.

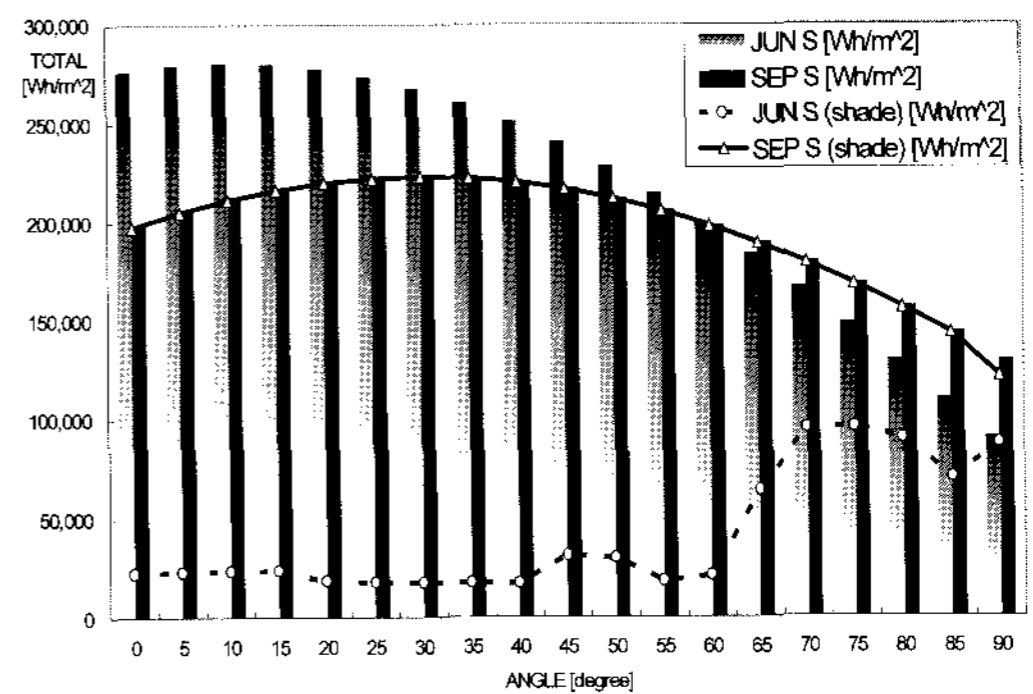


그림 7. 6월과 9월의 총 일사량과 PV에 영향을 미친 일사량 비교(Gap=0.58m)

그림 7에서 9월의 경우 음영이 지지 않기 때문에 모든 일사에 대해서 영향을 받지만, 6월 기울기 60도 이전에서는 높은 고도로 인하여 음영시간이 커 그 일사의 영향을 거의 받을 수 없었다. 즉, 9월에는 태양의 고도가 상대적으로 낮아 음영을 피할 뿐 아니라 청명한 날씨로 인하여 이때의 일사가 시

스팀에 미치는 영향이 더 크다고 사료된다.

6월은 일사량에 비해 음영이 많이 생겨 발전량은 크지 않음을 볼 수 있다. 7월은 우리나라 특성상 장마가 있어 총 일사량이 오히려 적어 그에 따른 PV발전량도 가장 작다. (그림 8)

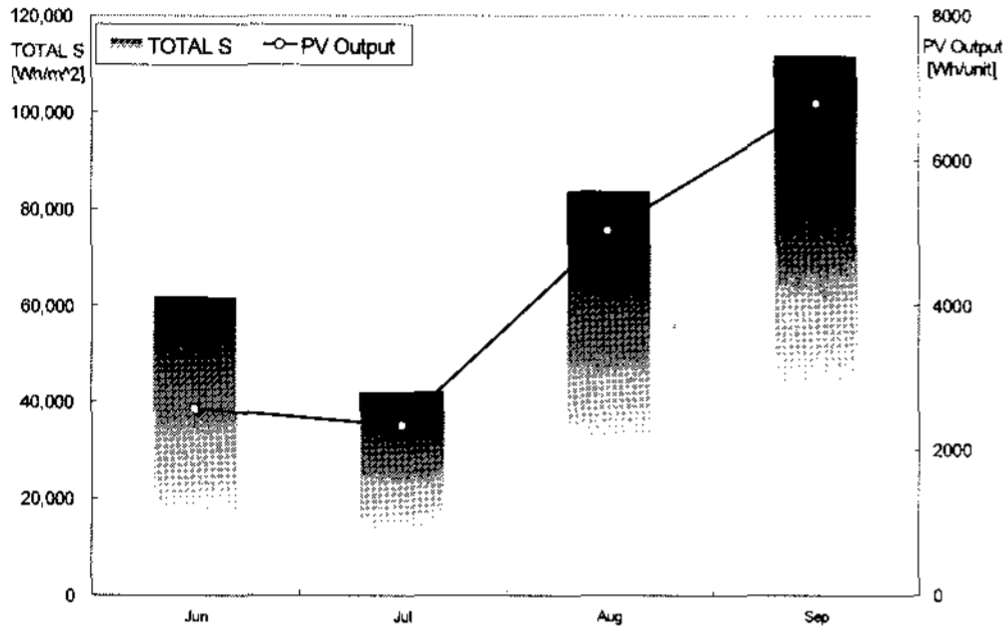


그림 8. 70도 경사면의 월별 일사량과 PV 전력

#### 4.2 여름철 야간 운영 시

오후 7시 이후에는 일사가 있다 하여도 그 일사의 세기가 너무 작아 주간 모드에서 시스템의 효과를 보기 어렵다. 따라서 이때가 야간 모드로 바뀌는 시점으로 하였다.

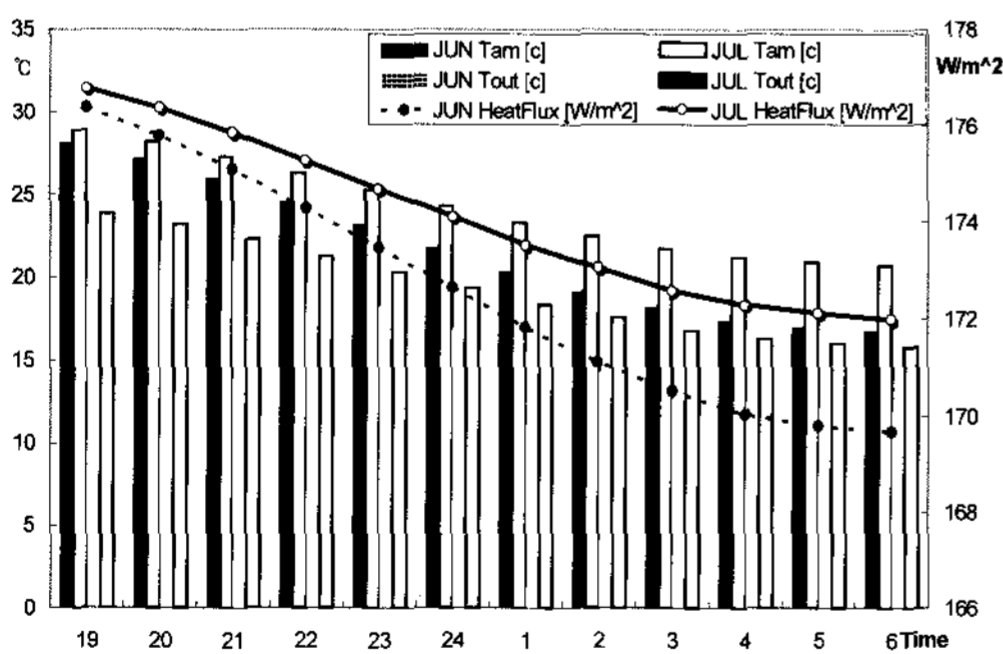


그림 9. 6, 7월 야간 천공복사에 의한 Heat Flux 변화

일몰 후 외기온은 점차 떨어지고 그에 따라 천공 온도도 감소한다. 선행 연구<sup>1),2)</sup>에서와 같이 외기 온도의 감소에 따른 천공온도의 변화에 따라 Heat

Flux가 약 170 ~ 177 [W/m<sup>2</sup>]의 분포를 보이고 있다. 이로 인하여 냉각된 공기의 온도는 실외의 온도보다 약 5 ~ 6 [°C]감소함을 볼 수 있다.

#### 4.3 겨울철 주간 운영 시

채널 안 유량 변화에 따른 시스템 효과의 변화를 산정하였다. 시스템 제안 단계로써 본 시스템의 에너지 수급 정도와 그에 따른 타당성을 검토하기 위해 정상상태로 분석하였다.

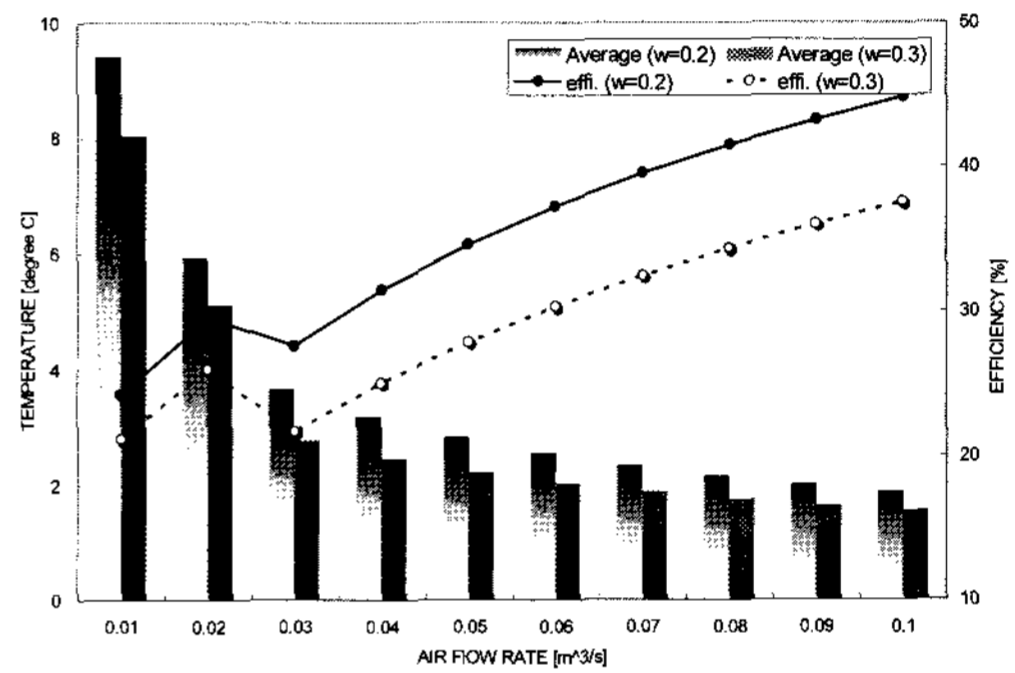


그림 10. 유량에 따른 출구 공기온도와 효율

그림 10에서 각 너비에 따른 유량이 증가함에 따라 출구의 공기 온도는 감소하였고, 효율 즉, Heat Flux는 증가하지만 그 기울기가 점차 완만하였다. 특히, 0.02 [m<sup>3</sup>/s] 이하의 값은 그 이후보다 훨씬 높은 온도를 갖고 효율도 증가하였다.

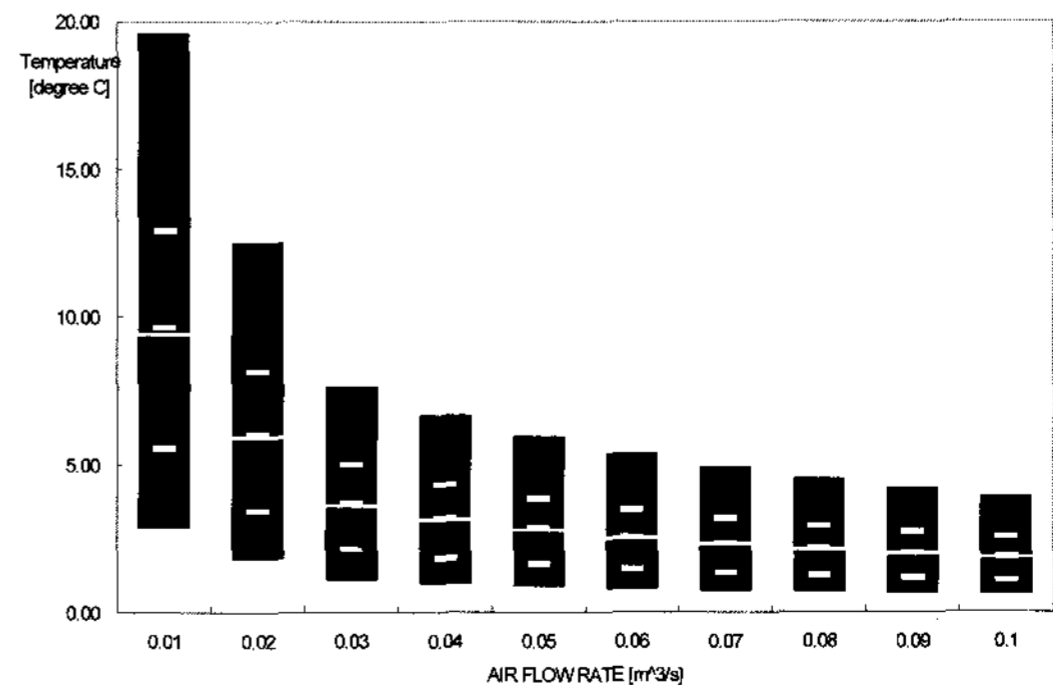


그림 11. 출구 온도의 사분위수



0.02 [m<sup>3</sup>/s]일 때 배출공기의 평균 온도가 약 6 °C로 실내에 직접 사용하기에는 충분치 않아 보이지만 그림 11에서 보듯이 그 분포는 최고 13 °C, 제 1사분위수도 약 8 °C이고, 본 시뮬레이션은 100% 신선외기를 실내로 유입시킨 경우로, 기존 HVAC시스템의 경우처럼 15 ~ 20%의 신선 외기와 85 ~ 80%의 실내공기를 함께 순환시키거나, PV에서 얻어진 전력을 이용하여 더 높은 온도의 공기를 실내로 유입할 수 있다고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구는 태양열, 태양광, 복사냉각을 이용한 각 운용모드 별 분석을 통하여 시스템의 제안과 가능성을 검토하고, 특히, 여름에 태양광을 최적으로 받기 위한 각도를 찾고자 하였다. 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 이 시스템을 통하여 외주부를 보강할 뿐 아니라 HVAC의 설비용량과 에너지까지 절감할 수 있음을 기대한다.
- (2) 재질로 인한 다양함과 운용모드에 따른 변화로 인해 건축의 심미적 효과로써 파사드 디자인에 기여한다.
- (3) PV 사이의 Gap이 0.58[m]인 시스템에서 그 기울기가 70도일 때 그 수급량이 최대였다. 시스템의 그 이하인 경우 음영 시간이 커 일사를 받기에 부적합하고, 기울기가 그 이상이면 일사의 범선에서 멀어지기 때문이다.
- (4) 6월에는 음영이 하루의 일사 90%가 집중되는 때(오전9시-오후3시)에 주로 분포한 반면 9월은 태양의 고도가 낮아 음영이 지는 시간이 거의 없어 가장 많은 PV 전기를 생산할 수 있다.
- (5) 여름 주간 PV 발전량은 17,222 [Wh/m<sup>2</sup>]로 그 효율은 5.6%이다.
- (6) 겨울 주간 유속에 따라 Heat Flux가 증가하지만 취출온도는 반비례한다. 따라서 유량 0.02

m<sup>3</sup>/s가 임계점으로 볼 수 있으며, 이 때, 취출 온도는 외기를 100%실내로 유입 시 평균 약 6 °C이상 예열되고, Heat Flux는 219,030 [Wh/m<sup>2</sup>], PV발전량은 30,246 [Wh/m<sup>2</sup>]로 각각 26%, 30%의 효율을 보인다.

- (7) 여름철 야간 천공 복사에 의해 냉각된 공기의 취출구 온도는 실온보다 약 5 ~ 6도 낮아 23 ~ 13 °C의 온도와 170 ~ 180 [W]의 냉각에너지 수급 분포를 나타내었다.

본 연구에서 실시한 분석 외에도 겨울철 결로를 막기 위한 적절한 취출온도와 이에 따른 적정 외기와 실내기의 혼합비율 또는 PV에서 생성된 에너지를 통한 열교환기의 필요 열량 등으로 외주부 환경을 더욱 개선하기 위한 알맞은 방법을 찾아야 할 것이다. 그리고 겨울철 야간의 이중외피 효과와 주간에서의 루버에 의한 시각 효과 등을 고려해야 할 것이다. 이 후, 이처럼 여러 시스템이 통합된 만큼 각각을 따로 분석한 것을 토대로 종합적 분석 또한 이루어져야 하겠다.

## 참고 문헌

1. 민성혜 외 3명. 외주부 환경 개선을 위한 태양열 집열기의 기능을 갖는 BIPV시스템 제안. 대한건축학회 2005 추계학술발표대회.
2. 민성혜, 서승직. 태양열 집열기 기능의 BIPV 시스템을 이용한 외주부 환경 개선에 관한 연구. KSES 2006 춘계학술발표대회.
3. 인하대학교 건축환경설비 연구실 편저. Transys를 이용한 건물에너지 해석. 건기원. 2004.
4. J. Hirunlabh, W. Kongduang, P. Namprakai, J. Khedari, Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate, Renewable Energy 18 (1999) 109-119

5. W.H. McAdams, Heat Transmission, third ed., McGraw-Hill, New York, 1954
6. W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, QJR Meteorological Society 89 (1963) 339
7. Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd., JOHN WILEY & SONS, INC., 1991.
8. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Heat and Mass Transfer, 5th., JOHN WILEY & SONS, INC., 2002.
9. G. N. Tiwari, Solar Energy Fundamentals, Design, Modelling and Applications, Narosa, 2004
10. Friedrich Sick and Thomas Erge, Photovoltaics in Buildings, James and James, 1998.
11. Li Mei et al, Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade, Energy and Buildings, 35, 2003.
12. X.Q.Zhai, Y.J. Dai and R.Z. Wang, Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors, Energy and buildings, 25, 2005.