

# 태양열 집열기 기능을 갖는 BIPV 시스템의 응용

민 성 혜<sup>†</sup>, 서 승 직

인하대학교 대학원 건축공학과, 인하대학교 건축학부 교수

## Application of BIPV System Functioned as Solar Collector

Sung-Hye Min<sup>†</sup>, Seung-Jik Suh

Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**ABSTRACT:** Perimeter zone has been reinforced by active systems, such as fan-coil units, because it causes an increase in heating and cooling loads, dew condensation in winter, or discomfort with cold-draft to residents in buildings, through poor insulation by light-weighted skin due to progressing multi-storied buildings and skyscrapers. However, because these active systems raise its capacity so that fossil fuel is used as much as they are added, and ultimately, greenhouse effect is urged, we proposed BIPV system functioned as solar collector which can substitute active system. As an early stage, heat balance equation in steady-state by Fortran was used not only for pre-heating effect and electric power capacity during the day in winter, but also for electric power capacity during day in summer and sky radiation effect during night in summer. Especially, we should have considered shading on PV, since even a little bit of it makes the efficiency too low for the PV to work. Still, when the flux of pre-heated air was increased to make air-barrier, its temperature was not enough to make it because the speed of heat exchange was too fast to warm up the air, thus the capacity to meet the condition was evaluated, and electric power from PV was made used for it.

**Key words:** 건물 일체형 PV (BIPV), 태양열 집열기 (Solar collector), 외주부 (Perimeter zone), 열평형 방정식 (Heat balance equation), 최적각도 (Optimal Angle), 음영(Shading)

### 기 호 설 명

$T_{pv}$	: PV 모듈 온도 [K]	$T_{sky}$	: 천공 온도 [K]
$T_{gl}$	: 유리 온도 [K]	$C_p$	: 공기의 비열 [J/kgK]
$T_{av}$	: 외피 평균온도 [K]	$m$	: 질량유량 [Kg/s]
$T_{am}$	: 외기온도 [K]	$S$	: 일사량 [ $W/m^2$ ]
$T_{f1}, T_{f2}$	: 유체유동공간 1, 2의 유체온도 [K]	$\sigma_b$	: 스테판 볼츠만 상수
$T_{co}$	: 집열관 온도 [K]		
$T_{ol1}, T_{ol2}$	: 유체유동공간 1, 2의 출구온도 [K]		
$T_w$	: 벽체 온도 [K]		

### 1. 서 론

얼마 전 발코니 확장 법안이 통과함에 따라 많은 공동주택과 아파트 입주자들이 더 넓은 면적을 사용하기 위해 확장을 하고 또는 그것을 고민하고 있다. 하지만 이것은 Buffer Zone을 생략시

킴으로써 실내를 더욱 외부환경에 노출시키는 결과를 초래한다. 또한, 고층건물의 외피 경량화는

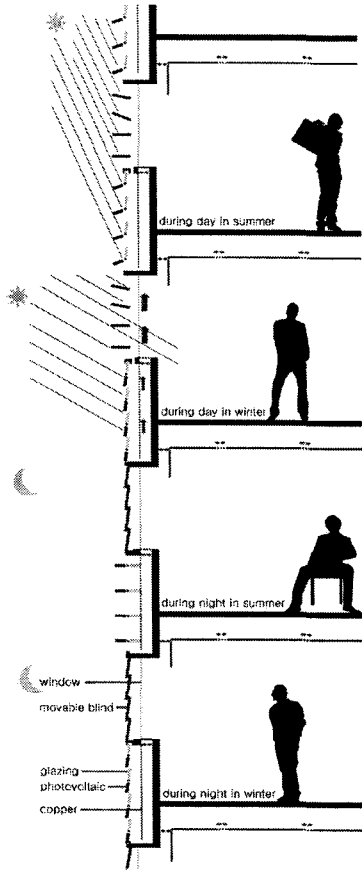


Fig. 1 Each season and day or night working mode.

단열성능을 저하시켜 냉난방부하 증가뿐 아니라 특히 겨울철에는 결로현상과 Cold Draft등으로 재실자들에게 불쾌감을 준다. 이것은 에너지 사용 증가와 이산화탄소 증가를 초래하여 온실효과를 부추긴다.

이를 보강하기 위해 외주부(Perimeter Zone)에 설비 시설을 사용하지만 이 또한 에너지를 사용한다. 따라서 이러한 공조 설비를 대신하여 신재생에너지를 사용하는 시스템을 제안하고 시스템 응용을 위한 기본적인 연구를 수행하였다.

## 2. 시스템 개요

본 시스템은 PV와 집열기를 그리고 창면에 루버를 통합시킨 자연형 시스템으로써, 운용방법에 따른 개념은 Fig. 1과 같다.

(1) 태양광발전 (PV) - 주간

(2) 태양열 (집열판) - 겨울철 주간

(3) 천공복사 - 여름철 야간



Fig. 2 The former and the alternative working modes during day in summer.

(4) 이중외피 - 야간 (밀폐 공간)

(5) 실내 태양광 유입 조절 - 주간 (루버조절)  
이 뿐 아니라 입면에 설치되는 이 시스템은 건축적 측면에서 볼 때, PV와 집열면의 유리 그리고 루버를 통한 각 재료의 특성과 색상, 그리고 운용에 따른 변화를 통하여 새로운 파사드를 창출하므로 심미적 효과를 기대할 수 있다.

한편, 여름철 PV전력량을 최대화 하는 경사 각도를 연구하던 중 PV 모듈(Module)에서 직렬 연결된 셀(Cell)들 중 하나라도 그림자가 드리워지면 그 효율이 크게 경감 된다는 것을 고려해 Fig. 2의 우측 디자인으로 수정하였다.

## 3. 연구방법

본 시스템의 겨울 주간 운용 방법에서 열적효과와 PV발전량을 산정하고 여름 야간 운용방법에서 천공복사에 의한 열적 이득을 보기 위해서 Fortran 프로그램을 통하여 각 모드의 정상상태를 분석하였다. 또한, 여름 주간에 PV발전량을 극대화하기 위해 IES-VE의 SunCast로 음영분석을 하고, 그 후 실제 일사량 데이터를 적용하여 음영시간을 제외한 효과를 보고자 하였다.

## 4. 이론해석

### 4.1 기본가정과 시뮬레이션 조건

- (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.

시스템 크기는 가로 1.2m, 높이 1.8m, 채널 폭 0.2m이다. 기본조건은 다음의 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Basic condition of simulation

	겨울	여름
기간	11월 - 2월	6월 - 8월
외기온 (°C)	0	25 (22-30)
풍속 $v_o$ (m/s)	2	2
유체입구온도	외기온	외기온
일사량(W/m <sup>2</sup> )	2004년 인천광역시 수평면일사량	

## 4.2 에너지 평형 방정식과 열전달 계수

### 4.2.1. 열평형 방정식

$$\tau\alpha_p S = \eta_p S + hv_o(T_{pv} - T_{am}) + hv_{f1}(T_{pv} - T_{f1}) + hr_{pam}(T_{pv} - T_{sky}) + hr_{pco}(T_{pv} - T_{co}) \quad (1)$$

외피에서 PV 모듈에 들어온 일사량은  $\tau\alpha_p$ 의 비율로 흡수되어 식 (1)과 같이 전기발전과 주변과의 열교환에 쓰인다.

$$\alpha_g S = hv_{out}(T_{gl} - T_{am}) + hv_{f1}(T_{gl} - T_{am}) + hr_{gla}(T_{gl} - T_{sky}) + hr_{gla}(T_{gl} - T_{co}) \quad (2)$$

유리면에 들어온 일사량은 투과 후  $\alpha_p$ 의 비율로 흡수되어 식 (2)과 같이 주변과 열교환 한다.

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

$$\tau_g \alpha_{co} S = hv_{f1}(T_{co} - T_{f1}) + hv_{f2}(T_{co} - T_{f2}) + hr_{cow}(T_{co} - T_w) + hr_{cof}(T_{co} - T_{av}) \quad (4)$$

유리를 투과한 일사는 집열판에 흡수되고 이 에너지는 식 (4)와 같이 주변과 열교환 한다.

$$C_p m (T_{o1} - T_{am}) / (L \cdot H) = hv_{f1}(T_w - T_{f1}) + hv_{f1}(T_{co} - T_{f1}) \quad (5)$$

$$C_p m (T_{o2} - T_{o1}) / (L \cdot H) = hv_{f2}(T_{co} - T_{f2}) + hv_{f2}(T_w - T_{f2}) \quad (6)$$

채널안의 유체가 얻은 에너지는 대류 열교환한 것과 같으므로 식(5), (6)으로 표현된다.

$$T_{o1} - T_{am} = (T_{f1} - T_{am})/\gamma \quad (7)$$

$$T_{o2} - T_{o1} = (T_{f2} - T_{o1})/\gamma \quad (8)$$

채널안의 유체는 완전한 흐름(fully developed

flow)이라 가정하고, Hirunalabh et al<sup>1)</sup>이 제한한 식을 이용하여 (7), (8)을 계산하였다.

Table 2 PV Performance

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

### 4.2.2. 열전달 계수

$$hv_{out} = 5.7 + 3.8v_{out} \quad (9)$$

외부 대류열전달계수 ( $W/m^2K$ )는 McAdams<sup>2)</sup>가 제안한 식 (9)를 사용하였다.

$$hv_f = \frac{k}{H} \cdot Nu \quad (10)$$

유체의 대류열전달계수( $W/m^2K$ )는 식 (10)을 사용하였다.

## 4.3 천공온도

$$T_{sky} = 0.0522 \times T_{out}^{1.5} \quad (11)$$

Swinbank<sup>3)</sup>이 제안한 식 (11)를 사용했다.

## 4.4 시스템의 에너지 수급량과 효율

$$q = C_f \cdot m \cdot (T_{o2} - T_{am}) \quad (12)$$

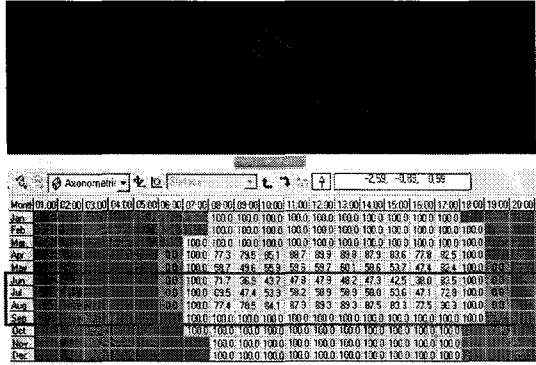
$$E_{pv} = \eta_p \cdot S \cdot L \cdot (H/3) \quad (13)$$

식 (12)는 유체가 얻은 열 에너지량이고, 식 (13)은 일사량 세기에 따른 전기에너지량이다.

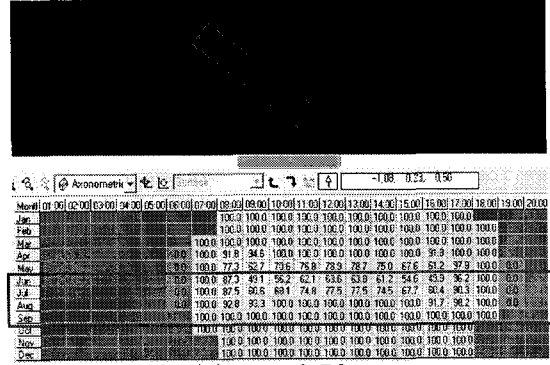
$$\eta_1 = \frac{q}{S \cdot L \cdot H} \quad (14)$$

$$\eta_2 = \frac{q + (E_{pv})}{S \cdot L \cdot H} \quad (15)$$

- 1) J. Hirunalabh, 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
- 2) W.H. McAdams, Heat Transmission, third ed., McGraw-Hill, New York, 1954
- 3) W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, QJR Meteorological Society 89 (1963) 339



(a) gap 0.45m



(b) gap 0.58m

Fig. 3 Percentage of irradiation area on PV module (25°)

식 (14)와 (15)는 열적효율과 PV의 발전량을 고려한 효율이다.

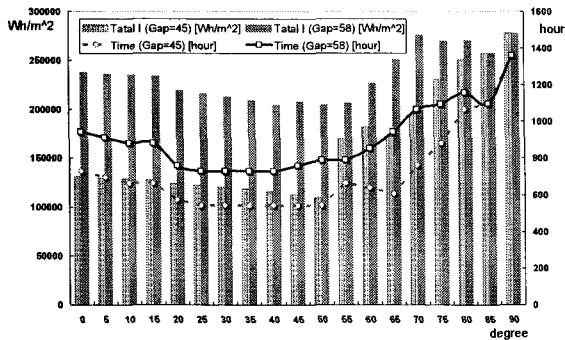


Fig. 4 Comparison between the former and the alternative design

영이 없는 시간, 그리고 그에 따른 일사량의 변화를 기존안(0.45m)과 수정안(0.58m)을 비교하여

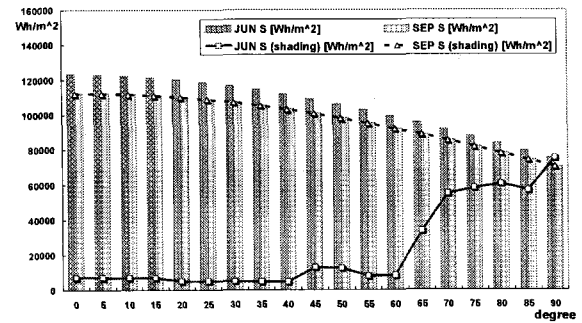


Fig. 5 Total and effective irradiation during each month (Jun. and August)

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 여름 주간 모드 분석

기존 디자인과 수정 디자인에서 음영이 지는 시간을 IES-VE SunCast에 따라 분석하였다.

Fig. 3은 PV 면적 대비 그림자를 제외한 부분의 비율을 각 달의 21일을 기준으로 나타내고 있다. 9월과 각 달의 일출 일몰 때를 제외한 모든 기간에서 PV면에 음영이 생김을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a),(b)를 비교하면 Gap=0.45m에서 음영 시간이 더 긴 것을 알 수 있다. 특히 8월 10시~15시에 음영이 없다. 여름에는 남중고도가 높아 간격을 늘려서 음영을 피해야 하고, 또한 PV의 형태가 동서로 긴 형태이므로 태양의 방위각이 큰 경우에도 영향을 크게 받을 수 있다.

Fig. 4는 각 각도에 따른 일사량의 변화와 음

나타내고 있다. 이 둘의 음영이 없는 시간이 현저히 차이가 나며, 그에 따라 일사량의 수급량도 큰 차이를 보이고 있다. 게다가 70도의 기울기에서 PV 면에 생기는 음영이 적고, 음영은 하루 일사량의 대부분을 차지하는 오전 9시부터 3시 사이를 피하므로 최적의 기울기로 볼 수 있다.

Fig. 5에서 9월의 경우 거의 음영이 지지 않기 때문에 모든 일사에 대해서 영향을 받지만, 6월은 9월보다 총 일사량이 더 많은데도 불구하고 실제 영향을 미치는 일사량은 훨씬 적음을 볼 수 있다. Fig 6에서 월 별 총량을 비교할 수 있다.

### 5.2 겨울 주간 모드 분석

채널 안 유량 변화에 따른 시스템 효과의 변화를 산정하였다. 시스템 제안 단계로써 본 시스템의 에너지 수급 정도와 그에 따른 타당성을 보고

자 하였다.

Fig 7에서 각 너비에 따른 출구 유속도 함께

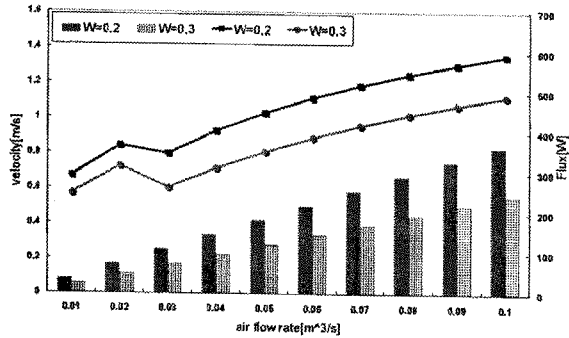


Fig. 7 Air velocity and Heat Flux in Channel (when solar intensity is 700W/m<sup>2</sup>)

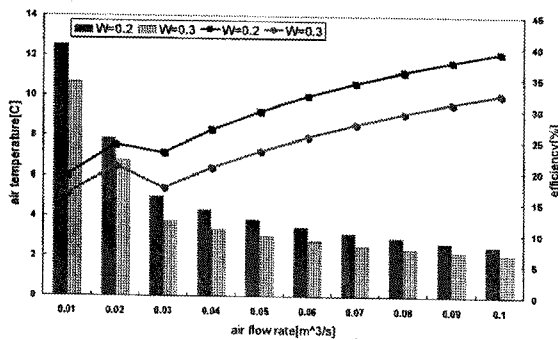


Fig. 8 Air Temperature and efficiency (when solar intensity is 700W/m<sup>2</sup>)

비례하여 증가하지만, Heat Flux는 점차 그 기울기가 더욱 완만해지고, Fig 8에서는 그 배출 온도가 감소함을 볼 수 있다. 특히, 0.02m<sup>3</sup>/s까지의 값이 그 이후보다 더 많은 에너지를 얻고, 훨씬 높은 온도를 갖는데 이는 그 이후의 Re수가 2300이상으로 일부 공기가 열교환을 충분히 지 않은 채 배출됐기 때문이다.

즉, 0.02m<sup>3</sup>/s의 유량을 설정하는 것이 효과적이거나 배출공기의 온도가 약 8℃로 실내에 직접 사용하기에는 충분치 않아 보인다. 그러나 이 시뮬레이션은 100% 신선 외기를 실내로 유입시키는 경우 이므로, 기존 HVAC시스템의 경우처럼 15-20%의 신선 외기와 85-80%의 실내공기를 함께 순환시키거나 또는, PV에서 얻어진 전력을 이용하여 부족한 열을 충당할 수 있다고 사료된다.

Fig.9에서 일사량이 증가함에 따라 시스템의 효율 모두가 점차적으로 감소하지만, 실제 얻는 열에너지와 전기에너지는 모두 증가함을 볼 수

있다. PV는 일사가 증가하면 열에너지 또한 증가해서 실효율은 감소한다. 즉 전체적으로 그 기울기가 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

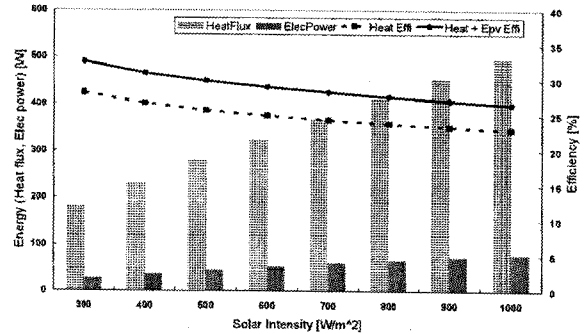


Fig. 9 Heat flux, elec. power and efficiency (when air flow rate is 0.03m<sup>3</sup>/s)

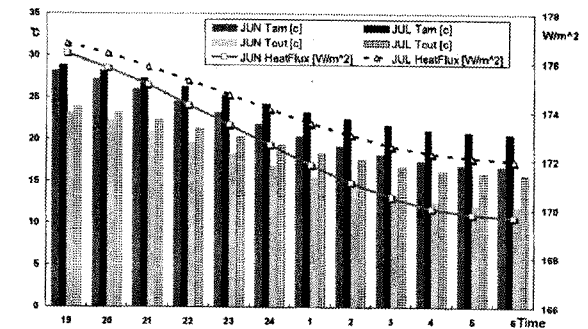


Fig. 10 Heat flux and outlet temperature by sky radiation at summer night

### 5.3 여름 야간 모드 분석

오후 7시 이후에는 주간 모드에서 효과를 볼 수 없다. 따라서 이 때가 야간 모드로 바뀌는 시점이 된다. 일몰 후 외기온은 점차 떨어지고 그에 따라 천공 온도도 감소한다. 이에 따라 더 많은 열이 손실되어 Heat Flux가 증가할 것이라 예상할 수 있지만 선행 연구에서도 볼 수 있듯이 외기 온도의 감소량 보다 천공온도의 변화가 조금 더 작고, 채널 안에서 집열판과 열교환 후의 취출온도의 변화 또한 작기 때문에 Heat Flux 또한 약간 감소함을 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 시스템의 제안과 가능성을 검토하고 태양열, 태양광, 복사냉각을 이용한 각 운용모드 별로 분석 고찰하였다. 특히, 여름에 태양광을 최

적으로 받기 위한 각도를 찾고자 하였다.

(1) 외주부의 환경개선을 위해 필요한 에너지를 자연형 에너지로 대체할 뿐 아니라, 외주부를 보강함으로써 중앙 HVAC의 설비용량과 에너지까지 절감할 수 있을 것으로 기대한다.

2) 입면에 설치되는 이 시스템은 파사드의 재질로 인한 다양함과 운용모드에 따른 변화로 인해 건축의 심미적 효과로써 디자인에 기여한다.

3) 태양의 고도가 가장 높은 6월 뿐 아니라 동 또는 서로 태양의 방위각이 치우친 경우에도 음영이 크게 드리워졌다.

4) PV 사이의 Gap이 0.58m인 시스템에서 그 기울기가 70도일 때 그 수급량이 최대인 것으로 보여 졌다. 여름에는 남중고도가 높아 이를 최적으로 수급하기 위해서는 법선으로 받아야 함을 고려했을 때, 70도의 각도는 적절치 않아 보인다. 하지만 약 30도 내외의 기울기의 경우 법선으로 일사를 받아 가장 클 것 같지만, 위 그래프에서 볼 수 있듯이 30-60도 기울기에서는 음영이 없는 시간은 매우 적음을 알 수 있다.

5) PV면의 기울기 변화에 따른 일사량의 변화가 매우 크지 않음으로 볼 수 있다. 따라서 수급면의 기울기보다는 음영을 피해서 디자인 하는 것이 더 우선시 해야 한다.

6) 6월에 음영이 지는 시간이 가장 많고, 음영이 지는 시간이 하루의 일사 90%가 집중되는 때(오전9시-오후3시)이므로 총 일사량에 비해 그 PV 전기 생산량은 매우 적었다. 반면 9월은 태양의 고도가 낮고 음영이 지는 시간이 거의 없기 때문에 가장 많은 PV 전기 생산량을 얻을 수 있었다.

7) 겨울 주간에는 유량 증가에 비례하여 유속은 증가하지만, Heat Flux는 유량 0.02 m<sup>3</sup>/s보다 작을 때 더 큰 효과를 볼 수 있다.

8) 겨울 주간 취출온도는 외기온을 100%실내로 유입 시 폭이 작고 유량이 적을수록 유체는 약 8℃ 이상 예열된다. 하지만 열류의 입장에서 볼 때 채널 폭이 작으면 취득열량을 작을 수밖에 없다.

9) 일사량이 증가함에 따라 효율을 떨어지지만 Heat Flux는 크게, 전기발전량은 약간씩 증가한다.

10) 여름철 야간 찬공 복사에 의해 냉각된 공기의 취출구 온도는 실온보다 약 5-6도 낮아

23~13℃의 온도와 170 - 180 [W]의 냉각에너지 수급 분포를 나타내었다.

본 연구에서 실시한 분석 외에도 겨울철 야간의 이중외피 효과와 루버에 의한 시각효과등을 고려해야 하겠다. 또한 실내의 기류분포를 통하여서 적정 유량과 유속을 찾을 예정이다. 여러 시스템이 통합된 만큼 각각을 따로 분석한 것보다대로 종합적 분석 또한 이루어져야 하겠다. 이뿐 아니라 겨울철 취출 공기의 온도가 낮은 것을 감안하여, 외기와 실내기의 비율을 통하여 또는 열교환기를 통한 온도 상승을 모색하여 외주부 환경을 개선하기에 알맞은 방법을 찾아야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Min S. H. et al., 2005, A Proposal of BIPV System Functioned as Solar Collector for Improvement of Perimeter Zone Environment, Proceedings of the AIK
2. Min S. H. and Suh S. J., 2006, A Study on Improvement for Thermal Environment of Perimeter Zone by BIPV Functioned as Solar Collector, KSES
3. Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd., JOHN WILEY & SONS, INC., 1991.
4. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Heat and Mass Transfer, 5th., JOHN WILLY & SONS, INC., 2002.
5. G. N. Tiwari, Solar Energy Fundamentals, Design, Modelling and Applications, Narosa, 2004
6. Li Mei et al, Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade, Energy and Buildings, 35, 2003.
7. 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.
8. Friedrich Sick and Thomas Erge, Photovoltaics in Buildings, James and James, 1998.