

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 3, 2006

아파트 입면형 PV적용방식의 발전성능 효과해석 연구

서정훈*, 허정호**

*신원이엔지(주)(max35@hanmail.net)

**서울시립대학교 건축학부(건축공학전공)(huhj0715@uos.ac.kr)

A simulation analysis of PV application method effect on electric power performance in an apartment wall facade

Seo, Jung-Hun*, Huh, Jung-Ho**

*Shinwon ENG. Inc.(max35@hanmail.net)

**University of Seoul, Department of Architectural Engineering(huhj0715@uos.ac.kr)

Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of building integrated PV application method on power generation. PV modules were integrated to a hypothetical apartment building facade in Seoul, Korea. Three different design options of PV panel mounted on exterior wall were developed for the analysis of cooling effects through ventilation. Numerical simulations using TRNSYS coupled with COMIS were executed to evaluate the design options. Their facade configurations are such as vertically installed PV panels with or without air gap between PV rear surface and exterior wall surface, and the tilted PV panels attached to the exterior wall at an angle of to the horizontal. Parametric results show that there is little difference regardless of the air gap width between PV rear surface and exterior wall surface. Special strategies which could effectively cool a PV panel to increase the electric power are required if we prefer to a vertical facade configuration in a building integrated PV installation. Consequently, it is expected that there is no reason for architect to install vertically PV panels with air gap unless active strategies are considered.

Keywords : 건물통합형 태양전지(BIPV: Building-Integrated Photovoltaics), 적용방식(application method), 발전량(generated electric power), 아파트 입면(apartment facade), 시뮬레이션(simulation)

기 호 설 명

- T_c : 태양전지온도(K),
- T_a : 외기온도(K)
- T_{c1} : 이전의 태양전지 온도(K),
- T_w : 외벽온도(K)
- T_{ab} : 태양전지와 외피사이의 공간온도(K)
- $T_{o,noct}, T_{c,noct}$: NOCT의 외기온도 및 태양전지 온도(K)
- SUN_{noct} : NOCT 조건에서의 일사량(W/m^2)
- SUN : 일사량(W/m^2),
- η_{ref} : 변환효율
- τ_a : 투과율과 흡수율의 곱
- h_1 : 외부와 태양전지와의 열전달계수(W/m^2K)
- h_r : 복사열전달계수($W/m^2 \cdot K$)
- h_2 : 외벽과 태양전지 사이의 대류열전달계수 (W/m^2K)
- K_a : 공기의 열전도율. $26.3 \times 10^{-3}(W/m \cdot K)$
- K : 전도열전달계수($W/m^2 \cdot K$),
- V_1 : 외부풍속(m/s)
- V_2 : 외벽과 태양전지 사이의 기류속도(m/s)
- v : 공기의 점성계수. $15.89 \times 10^{-6}(m^2/s)$
- ϵ_1 : PV 모듈의 방사율,
- ϵ_2 : 외벽의 방사율
- P : 발열량(J),
- m : PV 모듈의 질량(kg)
- C_p : PV 모듈의 비열($J/kg \cdot K$)
- D : PV 모듈과 외벽 사이의 간격(m)
- L : PV array 길이(m),
- I : 전류(A), R : 저항(Ω)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 고유가가 지속되고 있음에도 불구하고 주택 등 건물부분 전력에너지소비는 계속 증가하고 있다. 주택 등 건물의 외피와 일체화하는 태양광시스템

(BIPV: Building Integrated Photovoltaic)의 적용은 고유가 시대나 기후변화협약 이행의 대응책으로서 매우 시의 적절한 한 가지 방안이 될 수 있다. 그러나, 태양에너지는 상대적으로 변환효율이 낮으며 설치 시 넓은 공간을 필요로 한다. 따라서, 설치공간이 제한적인 건축물에서는 특히, BIPV시스템의 발전성능을 높이는 다양한 기술개발이 시급히 추진되어야 한다.

일반적으로 PV모듈의 셀 온도가 상승함에 따라 변환효율이 저하된다는 사실은 잘 알려져 있다. 국내에서도 이러한 특성을 고려해서 시스템의 효율을 높이려는 BIPV관련 연구사례가 최근 증가하고 있다^{1)~6)}. 김현일 등(2004)은 BIPV시스템의 효율을 향상할 수 있는 방안으로 공동주택의 발코니를 활용하는 실증연구를 제안하였다¹⁾. 김진희 등(2006)의 연구에서는 모듈의 전후에 통풍 공간 확보가 용이한 건물의 지붕구조 등을 대상으로 성능 실험과 시뮬레이션분석을 실행하였다^{2)~3)}. 건축벽체와 PV모듈간의 환기조건에 따른 영향을 현장실험을 통하여 윤종호 등(2006)에 의하여 확인하였다⁶⁾. 그러나, 국내 아파트건물의 입면 파사드 중 벽체에 대하여 PV 셀의 다양한 설치방식의 개선된 모델을 제안하고 분석한 기존의 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구는 BIPV의 설치방식에 따른 태양전지의 발전량 변화를 파악하고 태양전지의 효율 향상을 위한 보다 적극적인 대안을 선정하여 그에 따른 발전량을 분석하고자 한다.

1.2 연구방법

주거건물에서 큰 비중을 차지하는 아파트에 태양전지를 설치하는 것은 신·재생에너지의 좋은 적용사례가 될 수 있다.

아파트는 수평면보다 수직면이 넓기 때문에 아파트의 수직벽에 태양전지를 설치하는 것으로 가정하고, 태양전지와 수직벽과의 관계에 따라 설치방식을 구분하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하

였다. 일반적인 아파트의 평면 및 입면형태를 문헌 고찰을 통하여 파악하고 대상건물을 모델링하였다. 본 시뮬레이션 연구의 목적을 위하여 TRNSYS의 태양전지모듈을 수정하여 설치방식에 따른 발전량을 분석하였다.

2. 태양전지 모듈

태양전지모듈은 표면온도에 따라 발전량이 변화한다. 따라서 설치방법 중 덧대기 방식과 덧붙이기 방식은 태양전지모듈의 열전달이 중요한 요소로 작용한다. 실제로 덧대기방식으로 설치되는 BIPV의 경우 뒤쪽의 대류열전달을 고려하여 설치해야 한다.

기존 태양전지모듈의 온도관련 수식을 연구의 목적에 적합하게 수정하여 시뮬레이션 분석에 사용한다.

2.1 기존모듈 분석

식(1)은 TRNSYS의 기존모듈인 TYPE 94에서 태양전지의 온도를 계산하는 식으로 NOCT(Nominal Operating Cell Temperature: 표 1)를 기준으로 일사량과 외기온도의 변화에 따라 태양전지온도를 결정한다. 따라서, 대류열전달에 대한 항목이 없어, 현 상태로는 풍속 및 간격변화가 태양전지 온도에 주는 영향을 분석할 수 없다.

$$T_c = T_a + \frac{SUN \times (T_{c, noct} - T_{a, noct})}{SUN_{noct} \times (1 - \frac{\eta}{\tau\alpha})} \quad (1)$$

2.2 수정모듈 모델링

(1) 덧대기 방식

덧대기 방식은 외피와 태양전지가 일정한 이격 거리를 두고 설치되는 것으로, 태양전지의 온도를 계산하기 위해서는 태양전지와 외기간의 대류 및

복사열전달, 외벽표면과 태양전지사이에서의 대류 및 복사열전달, 그리고 내부저항에 의한 발열을 고려해야 한다(그림 1).

식 (2)는 태양전지와 외기간의 대류열전달과 복사 열전달을 포함하는 열전달계수로서, Hongxing Yang 등의 연구(2000)¹⁾를 참고하여 인용한 것이다. 식 (3)은 태양전지와 외벽사이의 대류열전달 계수로서, Nussel계수와 Reynolds수가 관여되며 식 (4)는 태양전지와 외벽 사이에서 볼 수 있는 일반적인 복사열전달계수이다. 식 (5)는 일반적인 저항에 관련된 식으로서 내부발열을 의미한다.

$$h_1 = 5.7 + 3.8 \cdot V_1 \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{K \cdot (5.801 + \frac{0.086 \cdot V_2 \cdot D^2}{\nu \cdot L})}{L} \quad (3)$$

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_c^2 + T_w^2)(T_c + T_{w, out})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

$$P = I^2 R \quad (5)$$

위의 식 (2)~(5)와 열 평형방정식을 이용하여 덧대기 방식에서의 태양전지 온도를 식 (6)과 같이 계산한다.

$$T_c = ((SUN \cdot \tau\alpha(1 - \eta_{ref}) - h_1(T_{cl} - T_a) - h_2(T_{cl} - T_{ab}) - h_r(T_{cl} - T_{w, out}) + P) / (m C_p) \quad (6)$$

(2) 덧붙이기 방식

덧붙이기 방식은 태양전지모듈의 외부와 접하는

1) Hongxing Yang et al., Simple approach to cooling load component calculation through PV walls, Energy and building vol.31, pp.285~290, 2000

쪽은 덧대기 방식과 같은 열전달이 일어나지만 외벽과 접하는 부분에서는 대류 및 복사 열전달이 아닌 전도에 의한 열전달이 일어난다. 따라서 전도열전달 계수 K 를 이용하여 태양전지온도를 계산한다 (그림 2).

덧붙이기 방식에서의 태양전지 온도는 식 (7)과 같다. 즉, 이 방식에서는 외벽과 태양전지 사이에서 대류와 복사 열전달은 일어나지 않고 전도에 의한 열전달만 일어나므로 이에 적합하게 식(6)을 수정하였다.

표 1. 태양전지 측정조건(NOCT)

측정조건	NOCT
경사각	AM1.5(37°)
총 일사량	800W/m ²
주변 공기온도	20℃
풍속	1m/s 이하

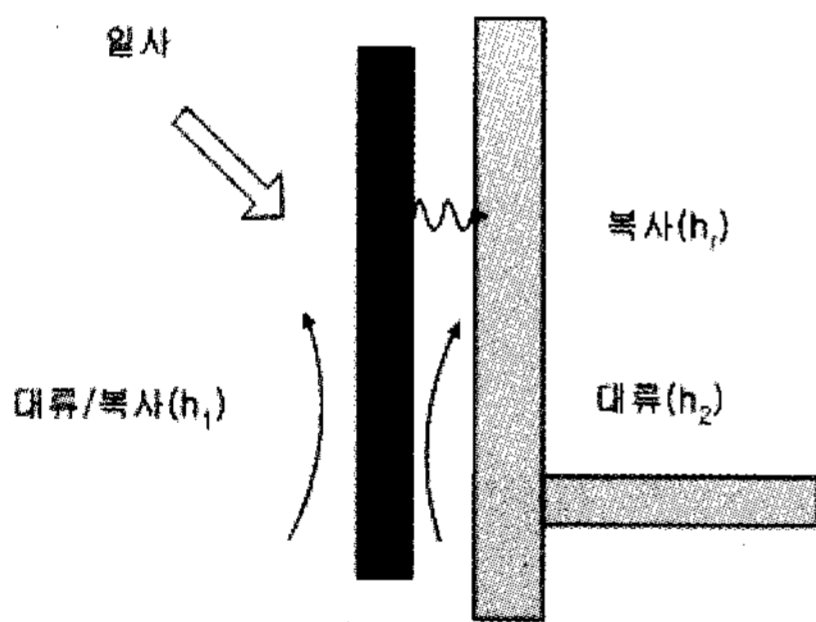


그림 1. 덧대기방식

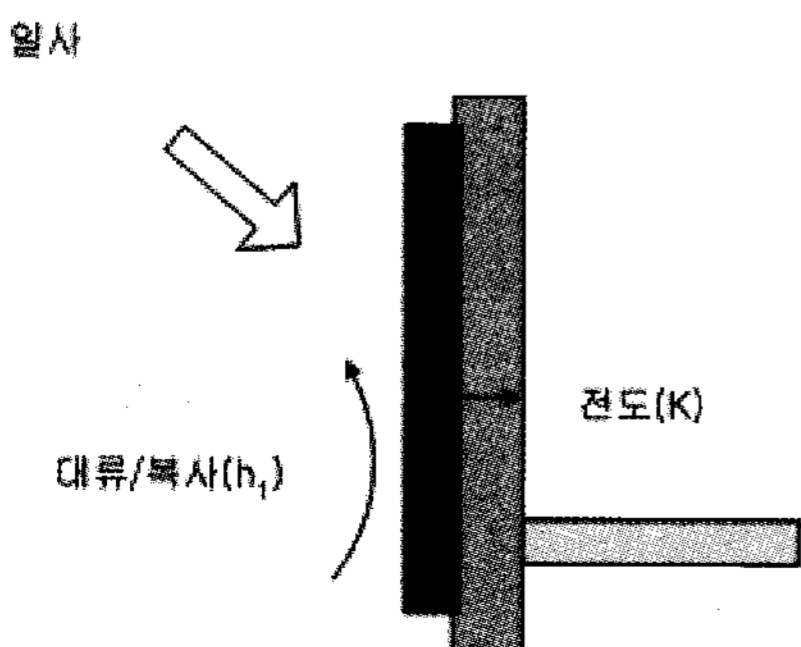


그림 2. 덧붙이기방식

$$T_c = ((SUN \cdot \tau \alpha (1 - \eta_{ref}) - h_1 (T_{cl} - T_a) - K (T_{cl} - T_w) + P) / (m C_p)) \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 분석

3.1 대상건물 및 시뮬레이션 프로그램

건축계획분야의 연구결과^{7)~10)}를 분석하여 대상건물을 선정하였다. 대상건물은 서울지역에 위치한 전형적인 26평형 아파트로서 전용면적이 59.98m²이고 주거공용면적이 27.1m²이다. 대상건물의 주동형태는 실제로는 L자형, 一자형 등 다양하나 그 중 一자형을 대상으로 모델링하였다.

그림 3은 대상건물의 평면도이다. 시뮬레이션 분석도구로서 TRNSYS와 기류분석 프로그램인 COMIS를 상호 연동하여 사용하였다.

3.2 시뮬레이션 방법 및 조건

(1) 시뮬레이션 방법

BIPV의 설치방법 중 덧대기 방식의 경우 태양전지모듈과 건물의 외피 사이에서의 대류열전달에 대한 고려가 필요하다. 이 경우, 대류열전달의 변수가 되는 것은 태양전지모듈과 외피 사이의 간격, 태양전지 높이, 그리고 기류속도이다. TRNSYS와 COMIS를 상호 연동시켜, COMIS의 결과인 외벽과 태양전지 사이의 기류속도를 대류열전달이 태양전지의 온도에 미치는 영향을 분석하기 위한 자료로 사용되었다. 태양전지와 외벽사이의 공간은 사방이 개방되어 있는 것으로 모델링한다. 태양전지와 외피 사이의 간격에 따라 열전달량이 달라질 수 있으므로 1~20cm 범위에서 1cm 간격으로 시뮬레이션을 실시하였다.

경사각을 가지는 설치방식은 0~90° 범위에서 10°간격으로 분석하였다. 경사각을 가지는 경우에는 열전달량의 변화보다 경사각에 따라 입사되는

일사량의 차이가 더 큰 변수가 된다. 따라서 간격이 20cm인 덧대기방식에서의 열전달계수값을 모든 경사각에서 동일하게 적용하고 경사각에 따른 일사량 변화만을 변수로 하였다.

대류열전달계수를 증가시키는 방식은 덧대기방식의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 태양전지와 외피 사이의 대류열전달계수 변화에 따른 발전량을 분석하고자 한다. 대류열전달계수는 유체의 속도와 열전도율, 태양전지 높이, 간격의 함수이다. 공기보다 약 24배 큰 열전도율을 갖는 물을 사용하는 경우를 대상으로 분석하였다. 물의 온도가 외기와 같은 경우, 그리고 10°C, 15°C, 20°C인 경우를 대상으로 분석하였으며, 외기온도가 높은 여름철(6~8월)만을 대상으로 하였다.

(2) 시뮬레이션 조건

시뮬레이션에 필요한 기상데이터는 서울의 온도, 습도, 일사량, 풍속, 풍향의 8760시간 데이터를 사용하였다. 대상건물은 부분발코니형을 대상으로 면적에 따라 설치하는 태양전지 모듈갯수를 결정하고 그에 따른 발전량을 시뮬레이션 하였다. 발코니, 실내, 태양전지 존으로 구분하여 모델링하였으며 실내와 발코니 부분은 환기횟수 2회/h로 가정하였다. 실내는 난방만 하는 것으로 가정하고 온도를 20°C로 설정하였으며, 발코니는 실제 아파트와 마찬가지로 냉·난방모두 하지 않는 것으로 설정하였다.

태양전지는 bp solar의 SX 10M²)를 사용하였고, 설치면적은 콘크리트벽체로 구성된 대상건물의 한쪽 발코니로 가정하여 1.4×3.8m로 설정하였다 (그림 4). 한 가구당 설치되는 태양전지는 병렬 5, 직렬 9개 이다.

사용한 태양전지의 특성은 표 2와 같다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 TRNSYS 모델링 화면이다.

2) 업체명과 모델명, www.bpsolar.com.

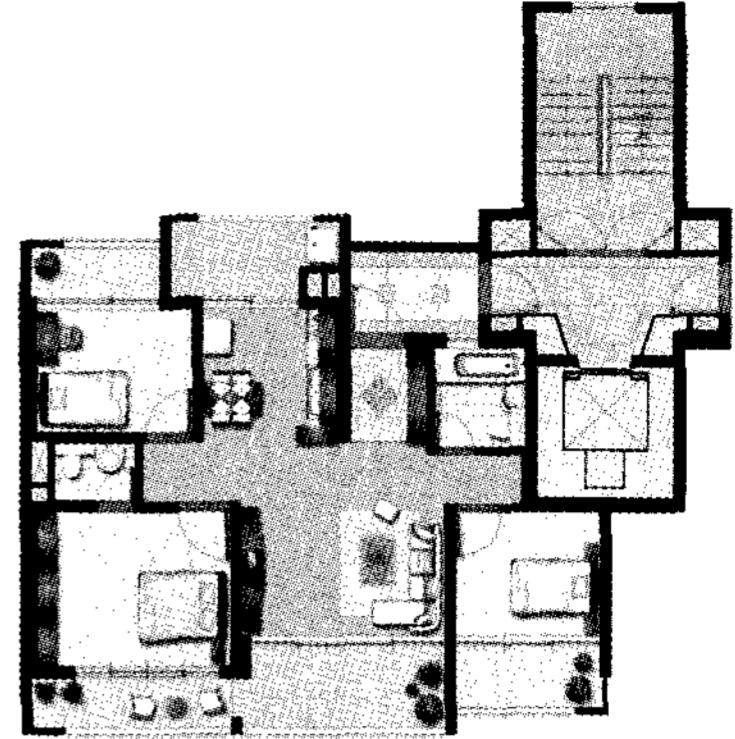


그림 3. 대상건물 평면도

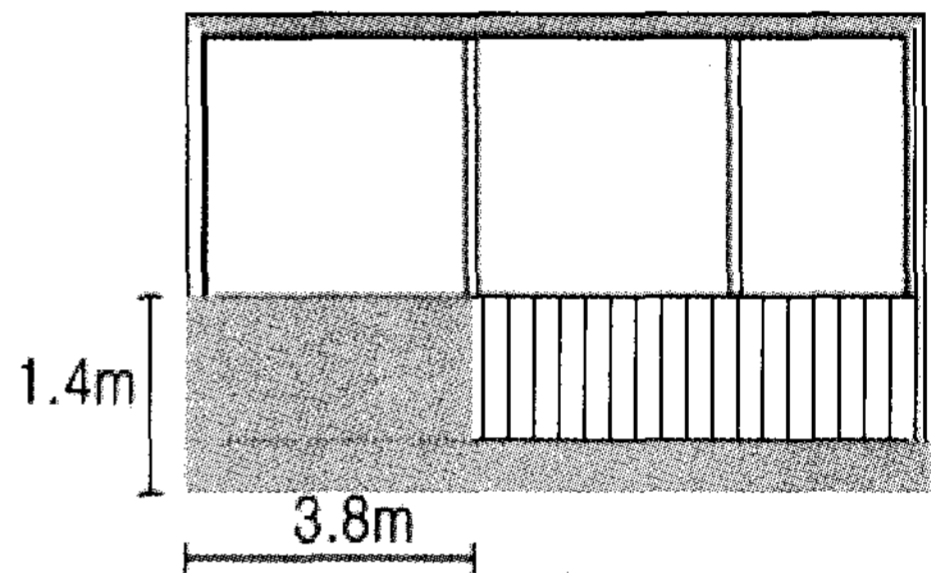


그림 4. 태양전지설치면적

표 2. 태양전지모듈의 특성

항 목	SX10M
최대출력(P _{max})	10W
최대전압(V _{mp})	16.8V
최대전류(I _{mp})	0.59A
최소보증출력 (P _{max})	9W
단락전류(I _{sc})	0.65A
개방전압(V _{oc})	21.0V
I _{sc} 의 온도계수	(0.065±0.015)%/°C
V _{oc} 의 온도계수	-(80±10)mV/°C
전력에 대한 온도계수	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT	47±2°C
무게	1.5kg

표 3. 대상건물 벽체구성 및 물성치

	재료명	두께(m)	전도열전달계수(W/m ² K)
외벽	모르타르	0.015	2.592
	콘크리트	0.2	5.04
	단열재	0.05	0.097
	모르타르	0.015	2.592
발코니벽	콘크리트	0.15	5.04

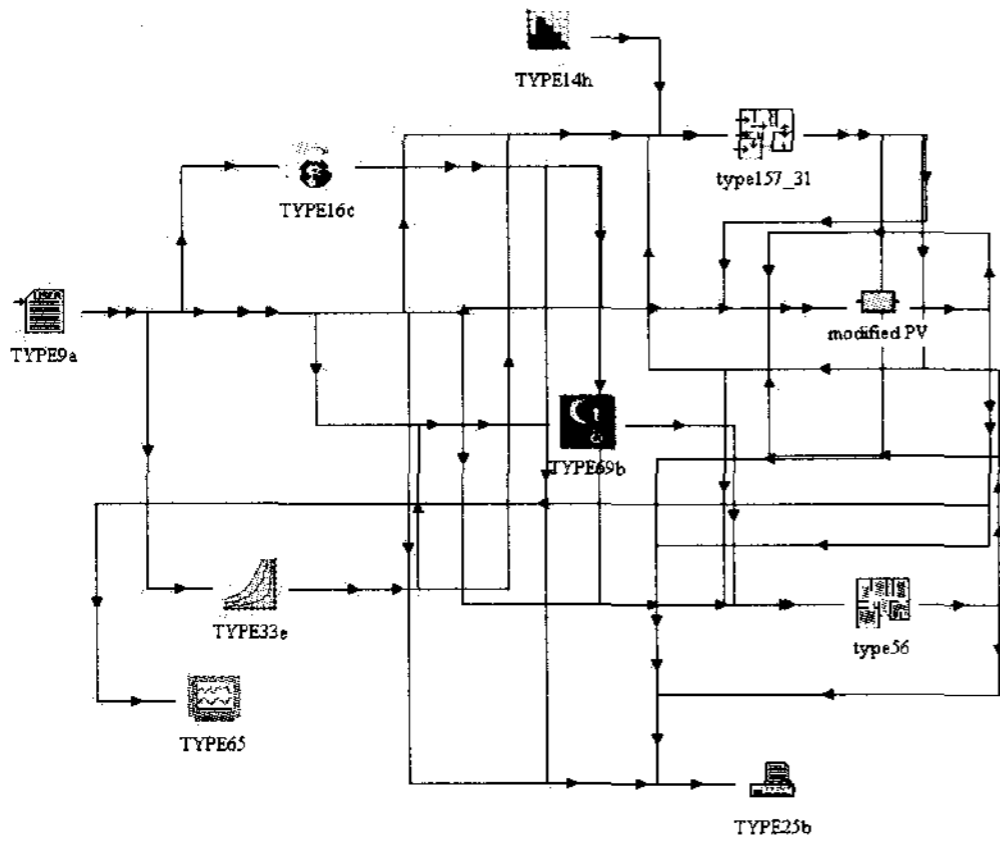


그림 5. TRNSYS 모델링

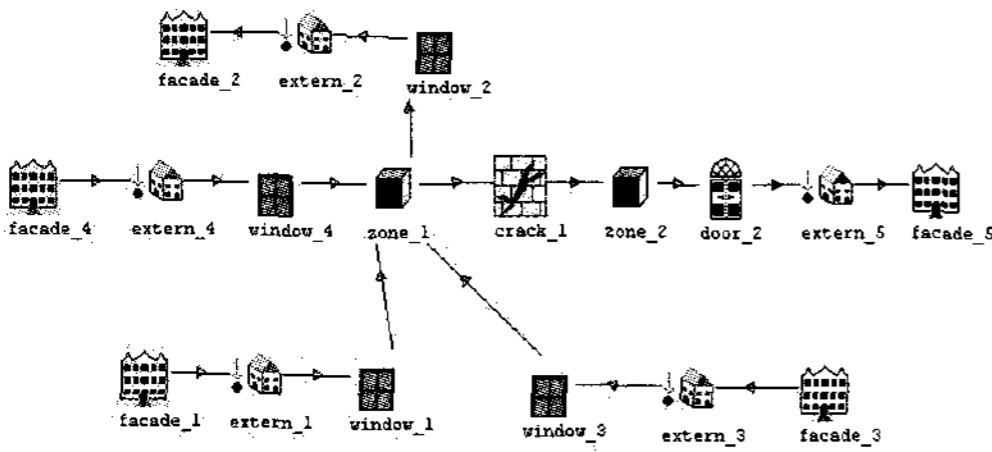


그림 6. 모델링

3.3 시뮬레이션 결과

(1) 덩대기방식과 덩붙이기 방식

그림 7은 2월 16일의 간격에 따른 태양전지온도 차 결과이다. 태양전지와 외피간격이 20cm일 때의 태양전지온도를 기준으로 간격에 따라 태양전지의 온도가 어떻게 변화하는 가를 파악하였다. 2월 16일은 일사량이 20~24MJ로 비교적 풍부한 날이다. 일사량이 많은 날도 태양전지의 온도는 간격에 따라 1~3°C로 근소한 차이를 보였다.

태양전지의 연간발전량은 태양전지와 외피사이의 간격이 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8은 외피와 태양전지 사이간격 변화에 따른 연간발전량을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 간격과 발전량 사이에는 높은 상관관계

($R^2=0.916$)를 갖는다. 20cm간격의 경우, 단위세대 당 연간발전량은 405.5kWh로 403.5kWh인 1cm의 간격보다 연간 전력량이 약 0.52% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 간격에 따라 연간발전량은 크게 달라지지 않는 것으로 판단된다.

덩붙이기 방식의 연간전력량은 401.7kWh로 덩대기방식과 연간전력량을 비교해보면 그 차이가 약 0.94%로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 일반적으로 아파트 발코니는 단열을 하지 않는 곳이므로 열관류율 K가 다른 외벽에 비해 매우 높다. 또한 발코니는 난방을 하지 않는 공간으로 내부온도가 높지 않은 것도 덩대기 방식과 덩붙이기 방식의 연간전력량 차이가 크지 않은 또 다른 원인으로 판단된다.

(2) 경사각을 갖는 방식

태양고도가 낮은 겨울철에는 0°일 경우가 전력생산이 가장 작고 60~70°일 경우 가장 큰 전력을 생산하는 것으로 나타났다. 중간기에는 30~40°일 경우, 전력생산이 가장 크고, 90°일 때 가장 작은 것으로 나타났다. 태양고도가 가장 높은 여름철에는 0~10°일 때 가장 큰 전력을 생산하며 중간기와 마찬가지로 90°일 때 전력생산이 가장 낮게 된다.

경사각에 따른 연간발전량은 그림 9와 같으며 40°전후에서 가장 큰 값을 보이고 90°일 때 발전량이 가장 낮게 된다. 가장 큰 발전량을 보인 40°를 기준으로 볼 때, 0°일 때는 14.8%, 90°일 때는 24.8%감소하는 것으로 분석되었다.

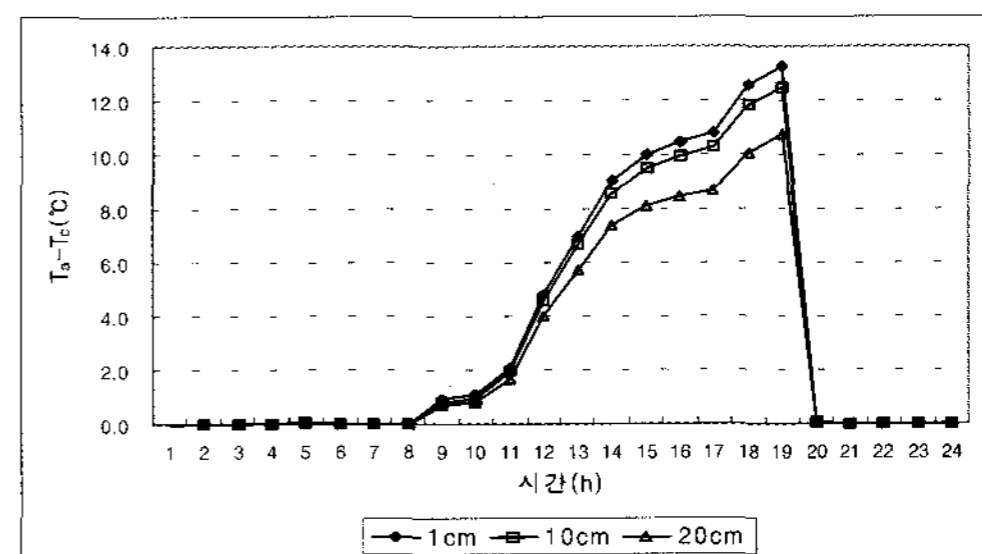


그림 7. 겨울철 맑은날의 태양전지와 외기온도차(2월 16일)

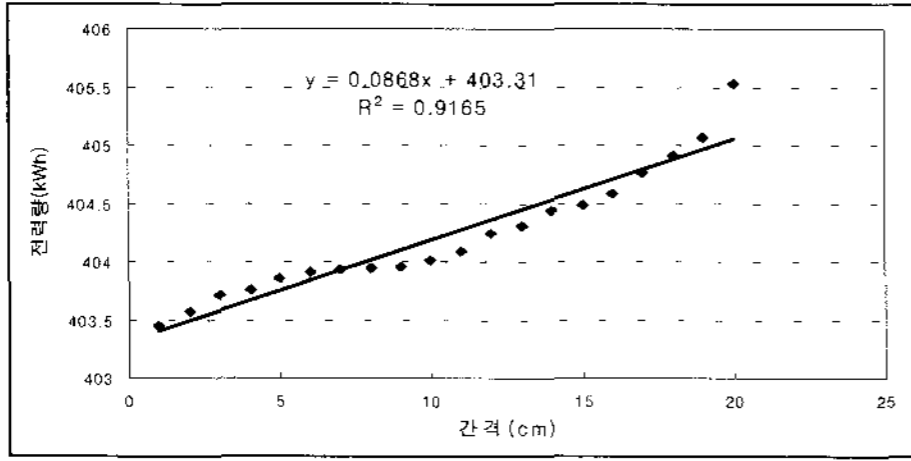


그림 8. 간격에 따른 연간전력량

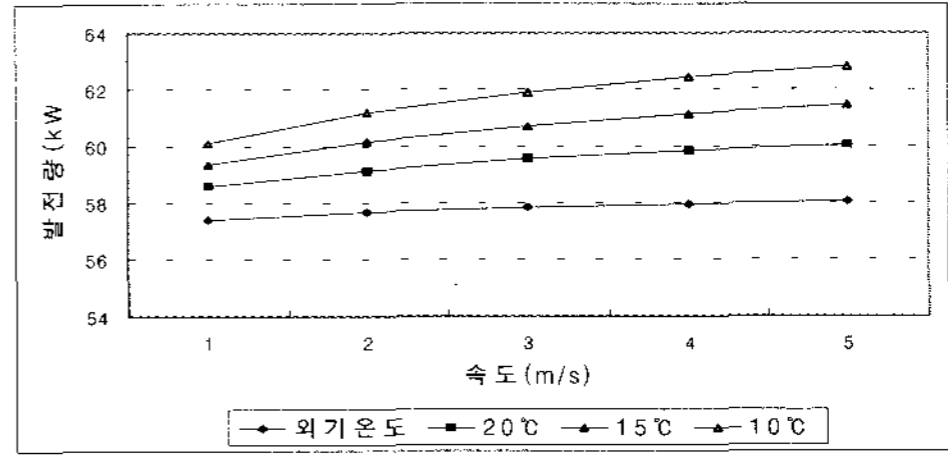


그림 10. 유체온도에 따른 태양전지 발전량(6~8월)

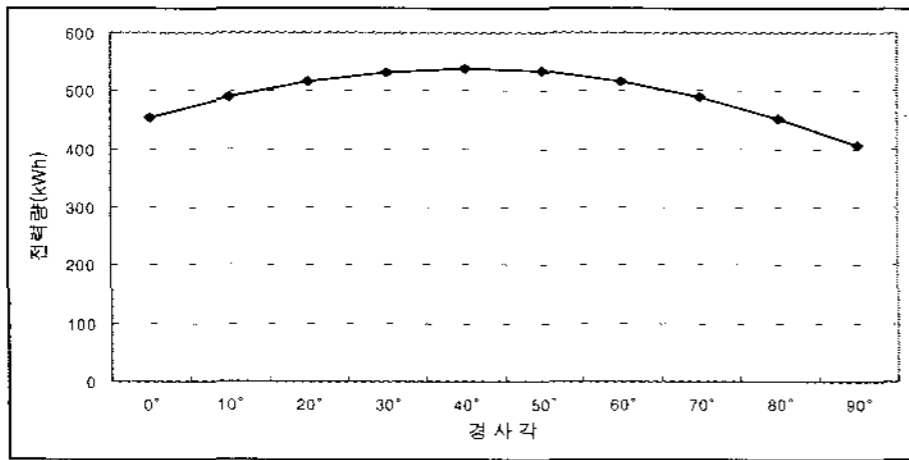


그림 9. 경사각에 따른 연간전력량

(4) 대류열전달계수를 증가하는 경우(수냉식)

태양전지의 열을 보다 적극적으로 제거하기 위하여 덩대기방식에 수냉식을 첨가하는 방안을 제안하였다. 대류열전달계수는 유체의 열전도율과 유속의 함수로서 유체로는 물을 사용하였고, 유속을 1~5m/s까지 1m/s간격으로 변화시켰다. 태양전지와 외피사이의 간격은 5cm를 대상으로 하며, 태양전지 온도가 높은 여름철(6-8월)만을 대상으로 하였다. 유체의 온도를 외기온도와 같은 경우와 유체온도가 10℃, 15℃, 20℃인 경우로 나누어 분석하였다.

그림 10과 같이, 유체온도가 20℃일 때에는 유체온도가 외기와 같은 경우보다 약 2~5%, 유체온도가 15℃인 경우에는 약 3.4~8.3%, 유체온도가 10℃일 때에는 5%부터 많은 차이가 있는 곳은 10%이상 발전량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 수직면에서의 여름철 일사량이 겨울철이나 중간기에 비해 적고 그에 따라 연간발전량 중 6~8월의 발전량이 차지하는 비율은 14% 정도이므로, 연간발전량 증가는 여름철의 발전량 증가보다 적을 것으로 판단된다.

4. 결 론

BIPV시스템의 설치방법이 연간발전량에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. 덩대기방식의 태양전지 외피와의 간격에 따른 발전량변화를 파악하기 위해 기존 TRNSYS 모듈을 연구목적에 맞게 수정하였다. 덩대기방식의 효율향상 방안으로 태양전지와 외피 사이의 대류열 전달계수를 증가시켰다. 대류열전달계수 변화에 따른 연간발전량 변화를 분석하기 위하여 열전도율이 큰 물을 사용하여 유속을 증가시키는 수냉식방법을 제안하였다. 연구결과에 대한 요약은 다음과 같다.

- 1) 경사각을 가지는 경우 경사각이 40°일 때 538.7kWh로 발전량 측면에서 상대적으로 가장 유리하다고 사료된다. 덩대기방식의 설치경사각인 90°일 때 가장 적은 발전량을 가졌으며 40°에 비해 약 24.8% 감소하였다.
- 2) 덩대기방식은 태양전지와 외피 사이의 간격이 커짐에 따라 연간발전량이 증가하는 것으로 나타났다으나 근소한 차이를 보였다.
- 3) 보다 적극적인 열전달 방안으로 여름철 물의 온도를 인위적으로 10℃, 15℃ 20℃로 낮출 경우, 온도 및, 유속에 따라 2~10% 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 주로 덩대기와 경사각을 가지는 방식을 대상으로 BIPV의 설치방법에 따른 발전량을 분석하였으나 실용화를 위해서는 보다 높은 변환효율이 요구되고 있다. 이를 위해서는 태양전지모듈자체 뿐

만 아니라 건물과 통합되는 부분에서도 보다 적극적인 방안이 다양하게 강구되어야 할 것이며 향후 실제 실험을 통한 검증과정 등의 지속적인 연구가 요구되고 있다.

후 기

본 연구는 2004년 서울시립대학교 연구교수지원비에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

1. 김현일 외 3인, 발코니형 BIPV 시스템 개발, 한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, pp.131~136, 2004.
2. 김진희 외 2인, 건물통합형 PV Solar Roof의 통풍효과 실험분석, 한국태양에너지학회 논문집, vol.26, no.1, pp.73~79, 2006.
3. 김진희 외 2인, 공기식 집열 BIPV 지붕시스템의 성능 모델링, 한국태양에너지학회 춘계 학술발표회 논문집, pp.282~287, 2006.
4. 서유진, 허창수, 고정식 집속형 PV모듈 복합패널의 BIPV적용성 검토, 한국태양에너지학회 논문집, vol.25, no.4, pp.78~84, 2005.
5. 서유진, 허창수, 반사판을 이용한 고정식 집속형 태양광·열 복합패널의 성능평가, 한국태양에너지학회 논문집, vol.25, no.4, pp.85~92, 2005.
6. 윤종호, 김재웅, 후면 환기조건에 따른 건물외피용 태양광발전(BIPV)모듈의 열적 영향에 관한 실험연구, 한국태양에너지학회 논문집, vol.26, no.1, pp.81~88, 2006.
7. 이기태, 아파트 외관형태 다양화 방안에 관한 연구, 충남대학교 석사학위 논문, 1999.
8. 차준호, 고층아파트 외관의 구성요소에 관한 연구, 단국대학교 석사학위 논문, 1996.
9. 김동준, 아파트 외관구성에서 발코니의 형태

- 적 특성과 유형별 현황조사 연구, 단국대학교 석사학위 논문, 2000.
10. 한길수, 아파트 평면의 변화과정에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문, 2002.
11. Brinkworth B. J. and et al., A validated model of naturally ventilated PV cladding, Solar energy, vol.69, no.1, pp.67~81, 2000.
12. Brinkworth B. J. and et al., Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays, Solar energy, vol.80, no.1, pp.89~103, 2006.
13. Cartmell B. and et al., A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: application, simulation and initial monitoring feedback, Solar energy, vol.76, pp.45~53, 2004.
14. Chow T.T. and et al., Building-integrated photovoltaic and thermal application in a subtropical hotel building, Applied Thermal Engineering, vol.23, pp.2035~2049, 2003.
15. Davis, M. and et al., Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures, Transactions of the ASME, vol.123, August, pp.200~210, 2001.
16. Hongxing Yang et al., Simple approach to cooling load component calculation through PV walls, Energy and building vol.31, pp.285~290, 2000.
17. Mei L and et al., Parameter estimation for ventilated photovoltaic facades, Building services engineering research and technology, vol.23, no.2, pp.81~96, 2002.