

건물일체형 투광성 PV모듈의 설치각도별 발전특성에 관한 연구

송중화*, 윤종호**, 안영섭*, 김석기*, 이성진*, 정연규***,

*코오롱건설(주) 기술연구소(song3705@kolon.com), **한밭대학교 건축공학과(jhyoon@hanbat.ac.kr),
***연세대학교 사회환경시스템 공학부(choung@yonsei.ac.kr)

Power Performance Characteristics of Transparent Thin-film BIPV Module depending on an installation angle.

Song, Jong-Hwa*, Yoon, Jong-Ho**, An, Young-Sub*, Kim, Seok-Ge*, Lee, Sung-Jin*, Choung, Youn-Kyoo***

* R&D Institute, KOLON E&C(song3705@kolon.com),
** Dept. of Architectural Eng., Hanbat National University(jhyoon@hanbat.ac.kr),
*** School of Civil and Environment Eng., Yonsei University(choung@yonsei.ac.kr)

Abstract

This study has analysed power output characteristics of transparent thin-film PV module depending on incidence angle and azimuth. The experiment results showed power outputs of transparent thin-film PV module applied to full-scale mock up model on slope of 90°, 30°, 0° to the south. The simulation results was evaluated power outputs of transparent thin-film PV module depending on incidence angle and azimuth after calibrating the experimental and computed data.

As a result, the best power output performance of transparent thin-film PV module was obtained at slope of 30° to the south, producing the annual power output of 977kWh/kWp. The annual power output data demonstrated that the PV module with a slope of 30° could produce a 68 % higher power output than that with a slope of 90°, with respect to the inclined slope of the module. Furthermore, the PV module facing south showed a 22 % higher power output than that facing to the east in terms of the angle of the azimuth. Specifically, the varying power output with incidence angle of PV module can be resulted from the influence of incidence angle modifier of glass on PV module. That is, the solar energy transmission can be reduced as an increase of incidence angle of PV module. Therefore, when the inclined slope of the PV module was over 70° there was a significant reduction of power output, and this was caused by the decrease of solar energy transmission in the transparent thin-film PV module.

Keywords : 박막 태양전지(Thin-Film Solar Cell), 건물일체형 태양광 시스템(BIPV ; Building Integrated Photovoltaic), 경사각(Inclined angle), 방위각(Azimuth angle), 연간발전량(Power Output)

1. 서 론

접수일자 : 2008년 03월 15일, 심사완료일자:2008년 04월 21일
교신저자 : 윤종호(jhyoon@hanbat.ac.kr)

1.1 연구의 배경 및 목적

기존 화석연료의 고갈, 온실가스로 인한 전 세계적인 기후변화, 고유가등으로 인하여 주

요 국가의 에너지 안보 수요가 늘어나고 있다. 신·재생에너지산업이 주목될 수밖에 없는 상황이다. 이에 정부기관, 연구기관, 학계에서는 당장 현실적인 에너지 문제뿐만 아니라 글로벌 재생에너지 확보를 위하여 기술개발연구에 전념하고 있다. 신·재생에너지에는 태양광, 태양열, 지열, 풍력등이 기술개발 에너지 분야로 각광을 받고 있다. 특히, 전력 부분에서 풍력과 태양광이 시장 성장을 주도하고 있다. 태양광은 2005년을 기준으로 55%의 성장(세계 재생에너지 관련기구, REN21)을 나타내고 있는데 이것은 태양광발전 연구가 1980년대부터 꾸준히 진행되어 전체 신·재생에너지분야에서 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 분석된다. 또한 태양광을 무한한 에너지원으로 사용하는 태양전지(Solar Cell)의 기술로 전기 생산력이 전 세계적으로 2000년도에 1,000MW 였으나 2030년에는 140,000MW¹⁾로 증가할 것으로 예상되고 있다. 또 유럽재생에너지위원회(European Renewable Energy Council)에 의하면 재생에너지는 기저부하²⁾(基底負荷)를 담당할 수 있을 뿐 아니라, 2040년에는 세계 1차 에너지 수요의 절반을 공급하는 게 가능하다고 결론을 내린 바 있다.

현재 전 세계적으로 태양광을 에너지원으로 사용하는 태양전지는 결정계 태양전지가 전체 시장에서 95%를 점유하고 있고, 비정질계 태양전지가 5%를 점유하고 있지만 비정질계의 박막전지(Thin-film PV)의 경우 원자재 절감을 통해서 저가화 연구가 활발히 진행되고 있고 특히, 결정계보다 온도상승에 따른 발전량 감소 비율이 현저히 낮아 고온에서도 발전성능을 향상시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 뿐만 아니라 건물의 지붕이나 외벽에 적용하여 건물 외장재 역할을 하는

건물일체형 태양발전 시스템(BIPV, Building Integrated Photovoltaic System)로서 공사 비용을 절감할 수 있고, 전기를 생산하는 이중효과도 지니고 있다. 또한 단열기능, 차양, 건축과 융화될 수 있는 디자인등의 측면에서 매우 큰 장점을 지니고 있어 미래 PV산업의 신성장동력이 될 전망이다. 국내에서는 후면 환기에 따른 PV모듈의 발전성능 평가³⁾, 3kW급 연계형 태양발전 시스템의 성능평가⁴⁾등의 결정계를 대상으로 한 연구가 활발히 진행되고 있지만 건축가들이 선호하는 건축창을 대체할 수 있는 투명 박막전지의 창조화 연구 및 건물 적용 사례는 최근에 초기 연구가 착수된 실정이다. 따라서 본 연구는 건축창호를 대체할 수 있는 박막 태양전지를 이용한 PV 복층창 시스템의 실제 건물 적용모형을 대상으로 장기간에 걸친 경사각별 발전성능의 모니터링을 수행하여 정량적 실측데이터를 정립하고, 이들 결과를 PV해석 시뮬레이션 결과와 비교 분석함으로써 박막 태양전지의 경사각과 방위각별 연간 발전량 데이터에 대한 실험적, 이론적 검증을 수행하는데 주 목적이 있다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 투명 박막태양전지를 라미네이션(Lamination)한 PV 모듈의 발전특성을 분석하기 위하여 PV 모듈의 제작, 실험을 위한 Mock-up모델의 경사각별 설계 및 시공, 장기모니터링 및 결과처리, 해석프로그램을 통한 경사각과 방위각에 따른 PV 모듈의 발전특성 분석등의 순서로 연구를 진행하였다.

본 연구에 적용된 투명 아몰포스 실리콘 박막태양전지(Thin-film Solar Cell)는 단판 모듈로 국내에서 생산이 되지 않아 외국제품을 수입하였으며, 이를 국내에서 복층창화하여 PV모듈화 하고, 건물에 적용하기 위해서 실

1) A. Zahedi, Solar photovoltaic(PV) energy: latest developments in the building integrated and hybrid PV systems, Renewable Energy 31(2006) 711-718

2) 기저부하란 한정된 기간에 계속적으로 걸리는 부하, 즉 전력 시스템을 운용하기 위해서 그 수준 이상은 항상 생산해야 하는 최소한의 전력을 의미한다.

3) 윤중호, 한규복, 안영섭 "주택 지붕일체형 PV시스템 후면환기에 따른 발전성능 변화 실험연구". 한국태양에너지학회 논문집, V.27 N.3, 2007.9

4) 소정훈 외 4인, 3kW급 연계형 태양발전 시스템의 성능특성 비교분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문집, vol.24, No.2, 2004.6

물 스케일 Mock-up 모델을 설계 시공하였다. Mock-up 모델이 완공된 후 9개월간 모니터링하고 측정된 발전 데이터와 동일기간 동안 해석프로그램을 구동하고 결과값을 보정한 후 경사각과 방위각에 따른 발전특성 결과를 통계·분석하는 방법으로 연구를 진행하였다. 특히 PV모듈의 연간 발전량 도출을 위해서 나머지 3개월간의 데이터를 30년 표준기상데이터의 월별 일사량을 근거로 연간 발전량을 비교 분석하였다.

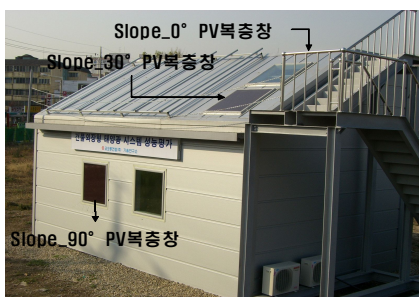
2. 실측결과를 통한 PV모듈의 발전성능 평가

2.1 개요

본 연구에서는 (표 1)과 같은 전기적 특성을 갖는 투명 박막 PV 모듈을 적용하기 위해서 가로 8m, 세로 5m, 높이 3.5m, 30° 경사지붕 및 평지붕이 복합된 형태로 Mock-up 모델을 (그림 2)와 같이 설계·시공하였다. 일사 수혜가 가장 양호한 남향으로 계획하였으며, 모델은 경기도 용인시에 위치하고 있다.

(표 1) 박막 PV모듈의 전기적 특성

항 목	전기적 특성
최대 출력(W)	44.0
최대전압(V)	59.6
최대전류(A)	0.74
개방전압(V)	91.8
단락전류(A)	0.972



(그림 2) Mock-up 모델의 전경

Mock-up 모델의 시공 후 모니터링 시스템

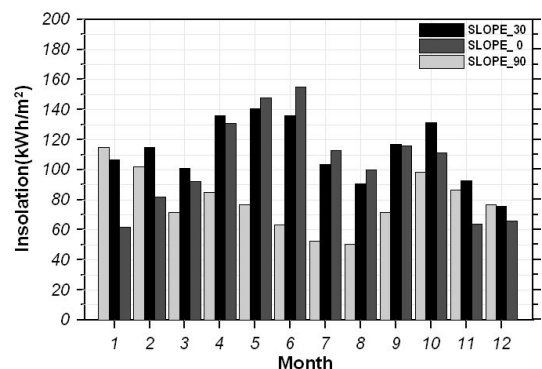
의 보정과정을 거쳐 도출된 2006년 11월부터 2007년 8월까지 9개월 동안 90°수직면(SLOPE_90), 30°경사면(SLOPE_30), 0°수평면(SLOPE_0)의 전일사량과 PV발전량 측정결과에 대한 통계처리 분석을 수행 하였다.

데이터는 1분간의 평균값을 매 1분 간격으로 저장하였다. 야간 및 오류 데이터를 제외하고 최종 선별된 데이터는 56개 변수에 대한 총 12,254,312개의 데이터를 대상으로 통계 분석을 수행하였다.

한편 본 연구의 실측결과는 인버터가 설치되지 않고 저항으로 부하를 처리한 경우의 직류 발전량에 대한 분석결과이다. 따라서 인버터와 연계되고 MPPT 최적제어가 수행된 측정결과와는 연간 발전량에 있어 다소 차이가 있을 것으로 사료된다.

2.2 월별 발전성능 평가 결과

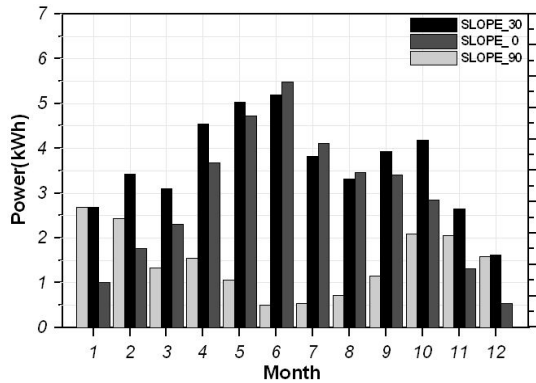
(그림 3)은 설치각도에 따른 월별 적산 일사량을 도식한 결과이다. 각 설치각별 월별 변화를 살펴보면 경사면(Slope_30)은 5월 147.7kWh/m²로 일사수열이 가장 양호하였고 12월은 75.3kWh/m²의 가장 낮은 일사를 수열 하였다. 수평면(Slope_0)은 6월에 일사수열이 가장 높았고, 1월에 가장 낮게 나타났다. 반면 수직면(Slope_90)의 경우 1월에 115kWh/m² 가장 많은 일사를 수열하였다. 특히 기상변화로 실측일사량이 12월보다 1월에 양호하였다.



(그림 3) 월별 일사량 실측 결과

8월에 50.2kWh/m²로 가장 낮은 일사를 수열 하였다. 이것은 태양고도에 변화에 따라 Slope_30과 Slope_0은 하절기에 입사각과 범선이 이루는 각도가 수평에 가까워 일사수열 조건이 양호하고, 이와 반대로 Slope_90의 경우에는 동절기에 입사각과 범선이 이루는 각이 수평에 가까워 일사수열 조건이 양호하기 때문이다.

(그림 4)는 설치각도에 따른 월별 발전량을 도식한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 월별 변화에서 Slope_30의 PV모듈은 하절인 6월에 가장 우수한 발전성능을 나타냈고, Slope_0의 경우에도 경사면과 동일하게 6월에 가장 우수한 발전성능을 보였다. 반면 Slope_90은 1월에 발전성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이것은 태양고도에 변화에 따라 각 PV모듈에 수열되는 일사량의 변화에 의한 것으로 본 연구에서 실험한 설치각도 중에는 Slope_30에 설치된 PV모듈의 발전성능이 가장 우수한 것으로 분석되었다



(그림 4) 월별 발전량 실측 결과

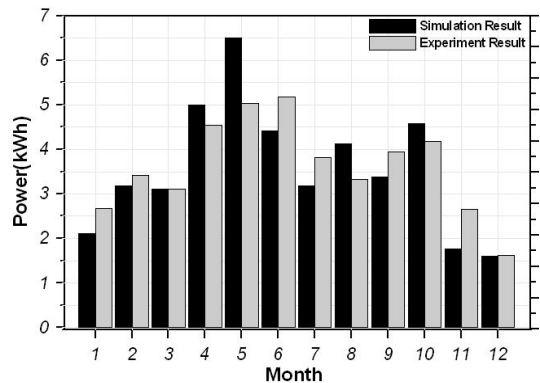
3. 시뮬레이션을 통한 PV모듈의 발전성능 평가

3.1 해석프로그램의 개요 및 검증

본 연구에서 구동된 해석프로그램은 미국 위스콘신 대학교 SEL에서 개발한 TRNSYS를 이용하였다. TNSYS는 태양열 시스템 뿐만 아니라 태양광 시스템의 발전량, 일사량, 온도,

풍속등의 시간별 데이터를 산출할 수 있는 전 세계적인 프로그램으로 인정받고 있다.

해석프로그램의 오차율을 비교·검증 후 보정한 월변화에 따른 실측발전량과 시뮬레이션 발전량을 (그림 5)에 나타내었다. 또한 설치각도 Slope_30의 PV 모듈을 대상으로 실측된 연간 단위 출력당 발전량 1,060kWh/kWp와 해석프로그램의 연간 단위 출력당 발전량 977kWh/kWp의 오차율을 비교·분석하였다. 그 결과 오차율이 8.5%로 나타나 오차 범위 내의 결과 값으로 판단하여 설치조건에 따른 발전량의 변화를 분석하기위한 해석프로그램을 구동하기로 하였다. 특히 5월의 발전량 차이는 기상변화로 실측 수열일사량이 양호하지 않아 발생한 것으로 분석되었다.

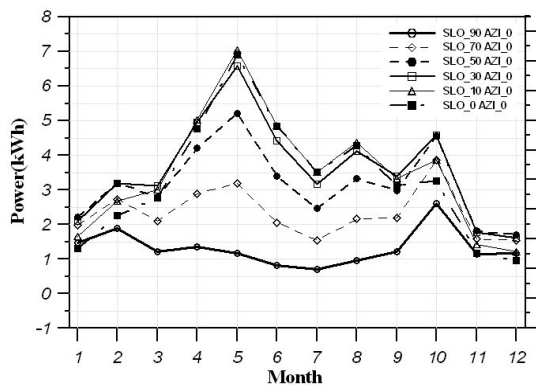


(그림 5) 해석프로그램의 보정 결과

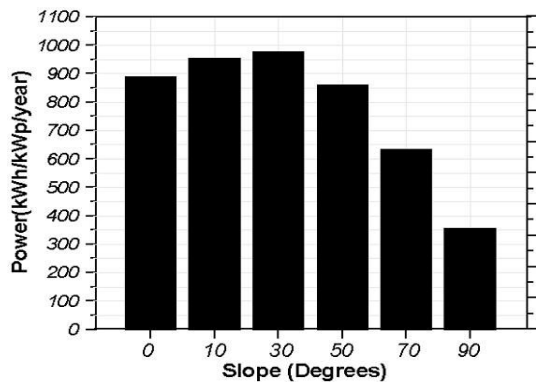
3.2 설치각도에 따른 발전성능 평가

실측실험에서는 정남향을 기준으로 한정된 경사각도(Slope_90, Slope_30, Slope_0)에 따른 발전량만 비교분석하였고, 해석프로그램 통하여 추가로 Slope_70, Slope_50, Slope_10의 경사각도별 발전성능 시뮬레이션을 시행하였으며 월별 발전량 분석결과를 (그림 6)에 나타냈다. 그 결과 정남향을 기준으로 경사각별 월별 변화는 Slope_30이내 범위의 낮은 경사각도에서 6kWh이상의 발전성능을 나타냈고, Slope_50이상의 경사각도에서는 6kWh미만의 발전성능 보이는 것으로 나타

났다. 또한 (그림 7)와 같이 연간 단위 출력당 발전성능 분석결과 Slope_30이 977kWh/kWp로 가장 높게 나타났고 Slope_90이 357kWh/kWp로 Slope_30에 비해 37%의 발전량을 나타내 분석된 경사각도중에서 가장 낮게 나타났다. 그다음으로 Slope_10은 954kWh/kWp, Slope_0은 890kWh/kWp, Slope_50은 860kWh/kWp, Slope_70 633kWh/kWp 순으로 나타났다.



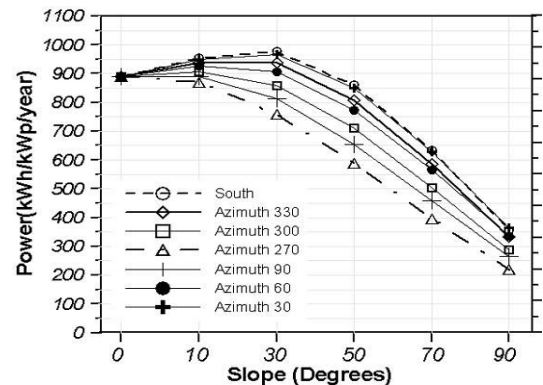
(그림 6) 정남향일 때 경사각에 따른 월별 발전량



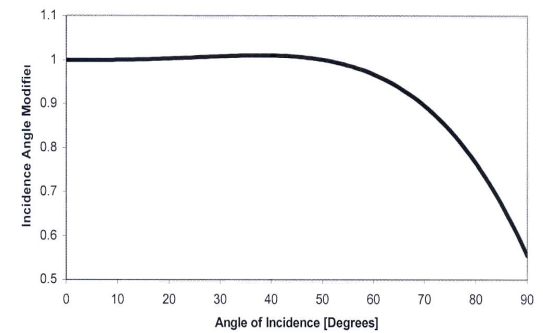
(그림 7) 정남향일 때 경사각에 따른 연간 발전량

그 밖에 분석된 방위각별 발전량 결과를 (그림 8)에 도식하였다. 분석된 방위각 변화에서 Slope_30에 설치된 PV모듈의 발전성능이 가장 우수한 것으로 나타났고, Slope_90에 설치된 PV 모듈의 발전성능이 방위각 변화에도 가장 저조한 것으로 분석되었다. Slope_30

를 기준으로 방위각별 연간 발전량은 분석된 방위각 중에서 정남에 설치된 PV 모듈의 발전성능이 가장 우수하였으며 정남(South)을 기준으로 남서 30(Azimuth 30)은 99%, 남동 30(Azimuth 330)은 96%, 남서 60(Azimuth 60)은 93%, 남동 60(Azimuth 300)은 88%, 정서향(Azimuth 90)은 83%, 정동향(Azimuth 270)은 78%의 순으로 발전성능을 나타냈다. 또한 PV 모듈의 연간 발전량이 일부 방위각도에서 Slope_30까지는 서서히 증가하다가 이후 경사각도에서는 감소하는 경향을 보였다.



(그림 8) 경사각에 따른 방위각별 연간 발전량



(그림 9) 입사각 수정계수 [King et. al, 1997]

특히 Slope_60부터는 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 PV 모듈의 전면부에 부착되어 있는 유리의 수정계수에 의

한 것으로 (그림 9)에 입사각에 따른 수정계수⁵⁾ 변화와 동일한 패턴을 보였다. 즉 경사각이 증가할 수록 PV전면에 부착되어 있는 유리의 특성 때문에 태양투과율(Tsol)이 큰 입사각도에서는 현저히 감소하게 되고 이것은 PV 모듈 발전량에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

4. 결론

본 연구에서는 건축창호를 대체하여 발전 및 채광, 창호의 기능을 복합적으로 발휘할 수 있는 BIPV 모듈인 투명 박막 PV모듈의 설치각도별 연간 발전성능을 평가 분석하였으며 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

- (1) 실물크기의 Mock-up모형을 대상으로 경사각별 연간 단위출력당 발전량을 분석한 결과 경사면 30° 1,060kWh/kWp, 수평면 0° 844.4kWh/kWp, 수직면 90° 431.6kWh/kWp 로 나타났다.
- (2) PV모듈의 실측과 시뮬레이션의 연간 발전성능 보정결과 오차율 범위 내인 8.5%로 나타났고, 시뮬레이션을 통해 분석된 경사각별 연간 단위출력당 발전량은 정남향을 기준으로 Slope_30에 설치된 PV모듈이 977kWh/kWp(100)로 가장 우수하였고, Slope_10, 50, 70, 90은 각각 954(98%), 890(88%), 633(65%), 357kWh/kWp(37%)의 순으로 발전성능을 보여 분석된 경사각에 따라 발전성능은 평균 24%, 최대 63%까지 격차가 나타나는 것으로 판명되었다.
- (3) 시뮬레이션을 통해 분석된 방위각별 연간 단위출력당 발전량은 Slope_30을 기준으로 정남향(South)에 설치된 PV모듈이 가장 우수하였다. 남서 30은 967kWh/kWp로 정남향 대비 99%의 발전성능을 보였

고 남동 30, 남서 60, 남동 60, 정서향, 정동향은 각각은 937(96%), 907(93%), 858(88%), 812(83%), 759kWh/kWp(78%)의 순으로 방위각에 따라 PV모듈의 발전성능은 평균 11%, 최대 22%까지 격차가 나타나는 것으로 판명되었다.

참고문헌

1. 이의준, 건물을 위한 신·재생에너지 이용연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, Vol. 1, No.3, 2007
2. 소정훈외 4명, PV시스템 최적화를 위한 손실요인 분석, 전력전자학회 논문집, 제 11권, 제 1호, 2006.2
3. 윤중호, 한규복, 안영섭 “주택 지붕일체형 PV시스템 후면환기에 따른 발전성능 변화 실험연구”. 한국태양에너지학회 논문집, V.27 N.3, 2007.9
4. 윤중호, 김재웅, “후면 환기조건에 따른 건물외피용 태양광발전(BIPV) 모듈의 열적 영향에 관한 실험연구”, 한국태양에너지학회, 한국태양에너지학회 논문집 V.26. N.1, 2006. 3
5. 소정훈 외 4인, 3kW급 연계형 태양발전 시스템의 성능특성 비교분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문집, vol.24, No.2, 2004.6
6. 유권중 외 1인, “태양광발전시스템의 보급기술 현황과 전망”, 한국태양에너지학회지, v.2 n.4, 2003. 11
7. TRNSYS Version 14.2 manual, SOLAR ENERGY LABORATORY UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON MADISON, WI 53706 USA, March 2000
8. A. Zahedi, Solar photovoltaic(PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems, Renewable Energy 31(2006) 711-718

5) TRNSYS Version 14.2 manual, SOLAR ENERGY LABORATORY UNIVERSITY OF WISCONSIN--MADISON MADISON, WI 53706 USA, March 2000