

공공건물 옥상녹화와 설치태양광(PV)의 효율향상 상관관계 연구

A Study on Correlation between Improvement in Efficiency of PV and Green roof of Public Building

이 응 직*
Lee, Eung Jik

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

This study aims to investigate advantages of complex installation of green roof and PV system in a public building, to analyze the impact of green roof on the efficiency of PV power generation, and to consider the correlation between green roof and PV power generation.

When the temperature and power generation of the modules installed in the green roof and non-green roof of the public building were measured for 3 days, the average temperature of the green roof was 23.6 degrees, and it was 36.1 degrees in the non-green roof which increased by nearly 53%. Overall, the module temperature in the green roof was lower. On the other hand, in relation to the PV generation depending on temperature reduction during the same period, the mono-crystalline module and the poly-crystalline module in the green roof showed an increase in generation at nearly 222.2W and 341.6W, and the efficiency rose by 5.5% and 6.2%, respectively, compared to the modules in the non-green roof. Therefore, it is analyzed that green roof has a positive influence on PV power generation. Finally shows the efficiency of the installed on the Green Roof PV system (complex Installation) higher than on the concrete roof PV system. Thus, the complex PV systems as well as the usual benefits of green roofs will provide greater synergies.

키워드 : 옥상녹화, 비 옥상녹화, 복합적용, PV발전, 모듈온도, 효율상승

Keywords : Greenroof, Non-Greenroof, Complex Installation, Power Generation, Module Temperature, Efficiency Rose

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

안전하고 효율적인 에너지 사용을 위하여 국제연합(UN)은 2012년을 ‘지속가능한 에너지의 해’로 정한바 있고, 2030년까지 에너지 효율 2배 향상이라는 목표를 달성하기 위하여 “모두를 위한 지속가능 에너지(Sustainable Energy for All)” 라는 캠페인을 시행하고 있다. 그에 따른 주요 3대 사항을 보면 첫째는 현대 에너지원에 전 세계적인 접근성 보장, 둘째는 에너지 효율 개선, 셋째는 에너지 사용량 중 재생에너지 점유율 확대이다.¹⁾ 이러한 차원의 범지구적 노력이 있어서, 특히 건물 에너지효율 개선 및 신·재생에너지 활용이 필수적인 사항으로 인식되는 것은 세계 건축물 소비 에너지량이 약 40%에 달하고 그에 따른 CO₂ 발생 또한 상당한 비중으로 작용함이 주지의 사실이기 때문이다.

결국 경제적, 사회적, 환경적 목표에 대한 소위 트리플 라인(triple bottom line)²⁾의 관점에서, 건물에너지 소비효율 개선

에의 투자는 궁극적으로 부족한 자원절약과 경제발전에 기여할 뿐만 아니라, 그에 따른 현재의 에너지원 혜택을 더 골고루 나누어 인간의 삶의 질 향상이라는 사회적 평등효과가 나타나고, 환경적으로는 세계적 에너지 효율 정책이 현재의 에너지 관련 CO₂ 감축을 2/3까지 가능케 할 것이라는 것이다.³⁾ 이러한 맥락에서 이미 우리 정부정책에 있어서도 ‘건물에너지 효율등급제’와 ‘신·재생에너지 공공기관 설치의무화 제도’ 등을 시행하여 왔고 근래에는 세종시 및 서울시 등이 에너지효율 1등급의 공공건축물 건설을 표방하여 그 세부기술로서 건물옥상녹화, 신·재생에너지 공급비중확대 등을 계획하고 있다.⁴⁾

그러므로 지속가능한 고효율 친환경 건축의 근간이 되는 고 단열 기법 및 신·재생에너지 적용 분야에 대표적으로 해당되는 건물옥상녹화와 태양광발전(이하 PV)시설의 활용가치는 매우 클 수밖에 없을 것이다. 그러나 현실적으로 옥상녹화가 이루어지는

1) 유네스코 한국 위원회(www.unesco.or.kr)

2) 약자로 TBL을 쓰며, 경제, 환경, 사회가 균형 있는 성장을 꾀하여 지속가능한 발전을 이룸으로써 환경문제를 해결하자는 이론

3) 한국환경산업기술원(www.konetic.or.kr) 자료

4) 아시아투데이, 2012.06.17 / 파이낸셜뉴스, 2012.08.31

* Dept. of Architectural Eng., Semyung Univ. South Korea
(drlee@semyung.ac.kr)

지붕의 용도는 휴식공간이라는 제한적인 경우가 대부분이며 PV 시설은 비 녹화의 일반 콘크리트 평지붕에만 설치·활용되는 형태를 취하고 있어서 현실적으로 지금까지는 옥상녹화와 PV시설이 각각의 친환경 기법으로 분리되어 적용되는 것이 정식으로 인식되어왔다. 그렇지만 만약 위의 두 기법을 동시에 적용하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 가능성이 주어진다면 건축의 에너지 효율 향상과 아울러 온실가스 배출저감 그리고 자원절약과 청정에너지 활용 등의 건물 부가가치 상승요인이 증가하는 긍정적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

따라서 본 논문의 목적은 공공건물에 옥상녹화와 PV장치가 복합적으로 설치 될 경우, 그 장점을 살펴보고 옥상녹화가 PV발전 효율에 미칠 영향을 분석하여 그 상관관계를 고찰하는데 있다.

1.2. 연구방법 및 범위

근래 신재생에너지 보급·활성화를 위해 공공건물의 옥상녹화 또는 PV발전 시설이 일반화 되어가는 과정에서 그 효과를 보다 구체적으로 정량화 할 수 있는 방법을 찾아 본 논문의 목적을 달성하기 위하여 옥상녹화 효과와 PV발전특성에 대한 기존연구를 문헌 및 인터넷 검색, 현장방문 등을 통한 이론적 고찰을 시행하였다. 이를 바탕으로 실제 상황에서의 측정데이터를 얻을 수 있도록 옥상녹화가 이루어진 관공서 건물을 선정하여 그 지붕현장에 다결정 PV 120W, 단결정 PV 80W 모듈 2장씩을 설치한 후, 녹화지붕면과 비 녹화지붕면을 구분하여 옥상표면과 그 상부의 온도 그리고 PV모듈 표면온도를 각각 실측하여 비교·분석하는 방법으로 연구를 진행하였다.

옥상녹화의 장점은 다양하게 논의되고 있으나 본 연구에서는 옥상녹화에 따른 건물 옥상부의 미기후 개선과 그 영향이 PV에 미치는 효율개선 효과에 그 무게중심을 두고자 한다. 따라서 본 논문에서는 옥상녹화표면과 그 지붕 상부 기온변화가 관심의 대상이며 계절적으로는 겨울철보다 PV모듈표면 온도가 상당히 높아지는 여름철 상황을 분석 대상으로 한다. 옥상녹화에 따른 열적 단열효과에 대해서는 기존 논문자료를 참고하였고, 실측자료의 객관성 확보에는 장기간의 측정이 바람직하지만 날씨와 장비의 한계로 비교적 일사량이 높은 하절기에 가까운 9월과 10월 사이의 일주일 이내를 측정기간으로 한정하였다.

PV모듈 표면온도에 따른 동작 특성은 실측값을 기존 효율변환 이론에 입각하여 분석하였는데, 이는 옥상녹화 효과인 녹화면의 열 부하 반사 및 그로 인한 PV장치 온도저감 폭을 확인하고 그로부터 옥상녹화와 PV동작의 상관관계를 고찰하는데 무리가 없다고 판단되었기 때문이다.

2. 선행연구 고찰 및 분석

2.1. 옥상녹화 시스템

옥상녹화는 악화된 도시환경의 생태적 복원을 근간으로 건물의 에너지 효율화에도 그 역할이 주목을 받으며 국내에서는 2000년대 집중적인 조망이 이루어졌다. 특히 옥상녹화에 의한 건물단열 성능에 대한 긍정적 영향을 입증하기 위하여 여러 연구기관에서 상당한 노력을 기울여 왔고, 정부에서는 지난 10년간 공공·민간

건축물 녹화사업 800건에 500억 원의 예산을 지원하며 2012년 4월 ‘건축물 녹화 설계기준’을 국토부를 통해 발표하기에 이르렀다.⁵⁾ 아울러 일부 지자체에서는 조례제정 등을 통해 옥상녹화 확산에 적극적인 자세를 취하고 있는 실정이다.

한편 옥상녹화에 따른 열성능 및 에너지 절약 관점에서의 국내연구는 강제식(1998), 김현수(1999)⁶⁾를 기점으로 2003년 안태경⁷⁾, 2004년 박찬필⁸⁾, 2005년 이동근⁹⁾ 등에 이어 2006년 오승환¹⁰⁾ 그리고 비교적 최근인 2009년 이춘우¹¹⁾로 이어졌고, 이 연구에서 여름 주간시간대의 옥상녹화시스템의 온도가 외기온도와 비교하여 약 8℃정도 낮게 나타났고, 콘크리트 표면과는 무려 약 23℃ 정도 차이가 나는 것으로 보고하고 있다.

또한 2009년 김주환¹²⁾의 연구에서 실제로 도시 내에서의 8월 여름의 지표면 온도를 열화상 카메라로 촬영한 결과 10℃ 정도 차이가 나는 것을 Fig. 1과 같이 확인하였다.

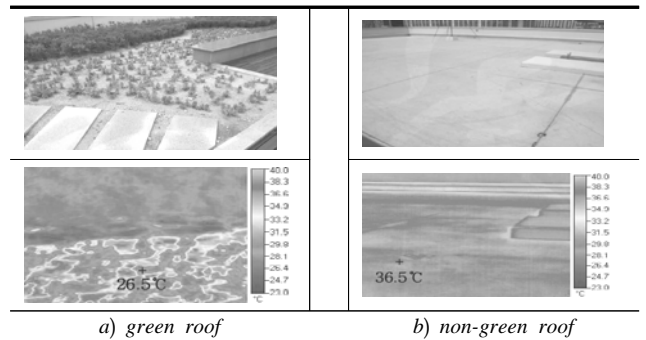


Fig. 1. Surface temperature of the green roof and non-green roof by the thermal imaging camera

국내 최대 냉방부하발생 시기에 실험주택을 통한 관련 연구¹³⁾에서는 옥상녹화시스템 토양층 표면온도가 주간시간대 경우 외기온도보다 5K 정도 그리고 야간시간대 경우는 외기온도보다 2~3K 정도 높게 유지되는 반면, 일반 콘크리트 표면온도에 있어서는 주간의 경우 외기온도보다 약 10~12K 높은 47~50℃의 온도분포를 보이는 것으로 나타났다. 이는 결과적으로 옥상녹화를 통해 지붕표면 온도를 외기온도 변화폭보다 상당부분 낮게 제어되는 상황으로 해석된다.

국외연구에 있어서도 Liu, K ; Baskaran B의 옥상녹화의 열 성능 평가논문에 따르면 일반 지붕표면은 여름철 최대 45℃의 온도 변화

5) 투데이에너지(www.todayenergy.kr) 인터넷 판, 2012.08.08
 6) 강제식은 옥상녹화에 의한 여름과 겨울의 열성능 특성을, 김현수는 경량형 옥상녹화 시스템 제안에서 에너지 절약과 도시열섬현상 완화 효과를 조망함. 이 경우의 측정결과로 콘크리트 표면과 옥상녹화 표면온도 차이가 약 2.7℃로 파악
 7) 안태경, 공동주택 최상층부의 옥상녹화에 따른 에너지절약 평가, 한국생환경학회지, 10(3), 2003
 8) 박찬필 외, 옥상녹화에 따른 콘크리트 건축물의 열환경 개선효과, 한국환경복원녹화기술학회지, 7(1), 2004
 9) 이동근 외, 옥상녹화조성에 따른 온도저감효과에 관한 연구_서울대학교 실험기를 중심으로, 한국환경복원녹화기술학회지, 8(6), 2005
 10) 오승환, 저관리 경량형 옥상녹화의 온도저감효과 분석, 서울대학교, 2006
 11) 이춘우, 옥상녹화 활성화를 위한 녹화 유형별 기온저감효과 및 시민의식 분석, 석사학위논문, 계명대학교, 2009
 12) 김주환, 학교건물에서의 환경녹화기법 적용에 따른 에너지 성능 평가에 관한 연구, 영남대학교 대학원, 2009
 13) 한국건설기술연구원, Green Roof 개발사업 IV(건축분야), 1999

를 보였으나, 옥상녹화 지붕의 표면온도는 평균 6°C 정도의 온도변화를 유지하는 것으로 밝혔다.¹⁴⁾ A.F speak¹⁵⁾(2013)의 URBAN CLIMATE 자료에서 열화상 카메라로 촬영한 사진을 보면 비 옥상녹화와 옥상녹화의 온도차이가 Fig. 2와 같이 10°C 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

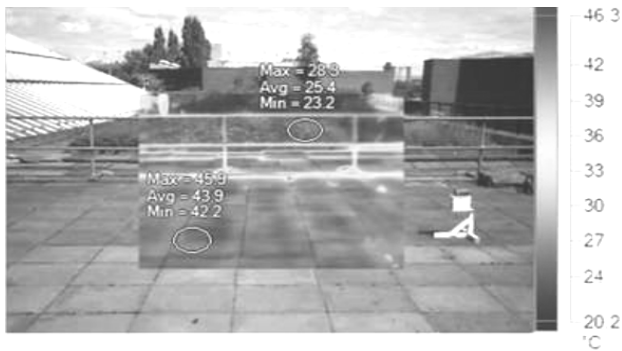


Fig. 2. Comparison of foreign cases
Source : A.F. Speak, J.J. Rothwell, S.J. Lindley, C.L. Smith, URBAN CLIMATE, 2013

이상과 같이 국내·외 연구를 통하여 비록 기후와 일사량의 차이가 있다고 하더라도 공통적으로 옥상녹화 표면의 경우가 일반 콘크리트 표면에 비해 상당히 낮게 유지됨은 일반적 현상으로 확인된다.

2.2. PV 온도저감에 의한 발전량 변화

PV 모듈온도와 발전량에 관한 선행연구를 살펴보면, 신혜영(2009)은 모듈온도와 발전량의 관계를 검토해보기 위하여 실제 건물 옥상에 설치되어 있는 용량 2.5kW급 태양광 발전시스템의 여름철인 7월, 8월의 측정 데이터와 1월, 2월의 측정 데이터 중 일사량이 비슷한 날짜를 선정하여 아래의 Table 1과 같이 정리하고 있다.

Table 1. Comparison of PV Generation in Sommer and Winter by a Previous Study

Radiation<W/m²>		Module T <°C>		PV Generation<W>	
Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
709	709	40	11	1840.95	2149.2
712	712	44	10	1933.08	2103.56
727	727	38	12	1956.83	2239.58
728	728	42	9	1861.96	2229.62
739	739	42	19	1995.17	2153.85
761	761	37	21	2064.94	2152.63
768	768	41	19	1999.89	2216.9
785	785	36	17	2157.47	2241.24
791	791	35	13	2075.24	2351.45
811	811	39	21	2197.72	2314.72
814	814	43	13	2106.44	2380.52

Source : Shin, H.-Y., A Study on the Power Output by Change of Temperature on the Front and Rear Side of the solar Cell Module, Hongik University Graduate School, 2009

결과를 보면 일사량이 동일한 날임에도 불구하고 여름철과 겨울철에 모듈 온도와 발전량에는 모듈의 온도가 낮은 겨울철의 발전량이 증가하고 있다. 이를 통해 모듈의 온도와 발전전력의 관계는 온도가 증가 할수록 발전전력은 감소하는 반비례 관계임을 알 수 있고, 모듈온도 1°C 감소 시 발전전력이 0.4~0.5% 증가한다는 모듈 특성도 확인하였다고 밝혔다.

또한 모듈의 온도를 감소시키는 실험 결과 모듈 전면의 온도만을 감소시키는 경우, 평균 발전전력증가율이 7.96%로 나타났고, 후면의 온도만을 감소시킨 경우, 평균 9.13%의 발전전력이 증가하였으며 전면과 후면 동시 감소시킨 경우는 평균 11.81%의 효율 증가를 보이면서 세 실험 중 가장 큰 효과를 냈다고 한다.¹⁶⁾

김윤식(2012)은 태양전지의 온도 의존 특성에 따른 효율 개선에 관한 연구에서 위의 연구와 마찬가지로 전면과 본체에 물을 분사하여 온도를 각각 감소시켜 전면의 경우 7.8%의 평균 발전전력증가율을 나타냈고 본체의 경우 평균 9%의 발전전력을 얻을 수 있었다는 결론을 얻고 있다.¹⁷⁾

2.3. 옥상녹화와 PV 복합적용

옥상녹화와 태양광 시스템의 복합 적용에 관한 연구는 많은 편은 아니지만, Köhler et al.(2007) 외 2명의 해외연구에서는 옥상녹화와 PV시스템의 통합은 긍정적인 결과를 가져온다고 하였다. 옥상녹화에 설치한 태양광발전의 전기 발전량은 일반 지붕에서보다 6%증가한다고 밝혔으며, 이유로는 옥상녹화가 주변온도를 낮춰 태양광 모듈의 온도가 상승하는 것을 방지한다고 한다.¹⁸⁾

독일의 Zinco회사에서도 옥상녹화와 태양광 시스템의 통합 시스템 효과로 아래의 Fig 3과 같은 보고서자료를 공개하고 있다.

그래프의 빨간색 선은 외부 기온이며 상부의 검은색과 회색 선은 비 녹화 옥상 부 설치 모듈이고, 아랫부분 녹색 선은 옥상녹화 지붕에 설치된 모듈을 나타낸다. 측정일의 낮 시간대 상황으로 하루 중 일사량이 가장 큰 2시에 비 녹화 옥상부의 모듈온도가 거의 40°C 가까이 올라가는 것을 확인할 수 있으며 옥상녹화에 있는 모듈의 온도는 27°C로 측정되었다고 밝혔다.

HongKong University의 Dr. Sam(2011)외 1명은 Integration green roof and solar photovoltaic systems에서 시뮬레이션 프로그램인 Energy Plus를 사용하여 연중 건물 에너지 시뮬레이션을 실행 시켜 본 결과 비 옥상녹화에 설치된 독립 시스템보다 옥상녹화 통합 PV시스템이 8.3% 더 많은 전기를 생산한다고 밝혔다. 또한 옥상녹화의 표면 온도 저감 효과와 PV모듈의 음영 효과로 인해 토양온도가 감소하는 것을 현장 측정을 통해 밝히고 있다.¹⁹⁾

14) 김지수, 옥상녹화의 온도저감 효과에 따른 PV효율 변화에 관한 연구, 세명대학교 대학원, 2011

15) A.F. Speak, J.J. Rothwell, S.J. Lindley, C.L. Smith, URBAN CLIMATE, 2013

16) 신혜영, 태양전지 모듈의 전·후면 온도변화에 의한 출력에 관한 연구, 홍익대학교 대학원, 2009.12

17) 김윤식, 태양전지의 온도 의존 특성에 따른 효율 개선에 관한 연구, 미래에너지 기술, 2012.07

18) Köhler, M., Wiartalla, W. and Feige, R., Interaction between PV-systems and extensivegreen roofs, In Proceedings of the Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, Minneapolis, April 29-May 1, 2007, 16 pages.

19) Dr. Sam C. M., Intergration of green roof and solar Photovoltaic systems, Hongkong University, 2011

이상과 같은 선행연구 및 이론고찰을 통해 PV모듈표면 온도와 PV발전량의 밀접한 상관관계를 확인할 수 있으며, 그에 따라 지붕의 옥상녹화가 PV가 설치된 지붕상부 공기온도에 미치는 영향을 구체적인 실측을 통하여 파악하므로써 실질적으로 옥상녹화가 PV발전량 증가에 기여하는지 여부를 3장에서 확인코자 한다.

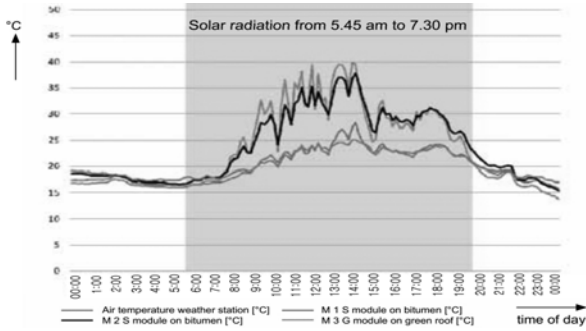




Fig. 3. Measurement data of 06 July 2009 at Zinco company

3. 옥상녹화 PV발전량 측정실험

3.1. 실험현장 개요

국내에서의 상황을 비교·확인하기 위하여 실제장소에서 측정을 진행하게 되었고, 그 대상은 D시 시청 청사로 선정 하였다. 건물 옥상 개요로 전체 면적 2100㎡ 중, 1300㎡를 녹화 구역으로 2009년 시공되었으며, 세덤류를 비롯하여 사철나무, 라일락 등의 식물을 식재하고 관수 시스템을 통하여 상태가 양호하게 관리되고 있다. 자세한 내용은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2. Overview of the 'D' City Hall

	
Address : 100 Dunsan-ro Seo-gu Daejeon	
Roof type : Flat roof	
Creation of green-roof : 2009 (5 Floor roof)	
Green-roof system : Mixed (Soil depth 30cm)	
Status of vegetation : 60 kinds	

3.2. 측정방법

측정 방법은 단결정 80W, 다결정 모듈 120W를 각각 1개 씩 옥상녹화와 비 옥상녹화 구역에 설치하여 PV모듈에 TC센서를 부착하고 일사량계 MS-802 와 I-V Curve Tracer인 MP-160 과 TC selector MI - 540, PV selector MI- 520으로 발전량과 모듈 본체의 온도를 동시에 측정하였다.

다음의 Table 3은 실험에 사용된 모듈의 STC(Standard Test Condition) I-V Test Report로서 각 모듈 간 정확한 비교를 위한 사전 측정값으로 모듈들의 효율 차이가 아주 미세한 것

으로 확인되어 일반적 비교에 무리가 없다고 판단된다.

측정 장소에 Fig. 4와 같은 실측 장비를 단결정과 다결정 모듈 각 1장으로 구성된 측정 Set에 연결하였으며, 측정 포인트는 각 모듈의 전면, 후면 그리고 발전 연결부, 일사량계, 발전량 측정 장비 순으로 보이고 있다. 특히 전면의 경우 부착센서에 의한 음영 문제를 해소하기 위하여 모듈 가장자리를 측정 포인트로 잡았다.

Table 3. Measurements of the modules under STC

	Poly-crystalline 120W		Mono-crystalline 80W	
	Module A	Module B	Module C	Module D
Pmax.(W)	120.7	120.5	74.4	75.7
Voc.(V)	21.8	21.6	21.5	21.6
Isc.(A)	7.87	7.82	4.96	4.92
Vmp.(V)	16.8	16.8	17	17.3
Imp.(A)	7.18	7.18	4.39	4.38
FF.(%)	70.2	71.2	69.8	71.1
Cell eff.(%)	14	13.9	13.9	14.2
module Eff.(%)	13	13	11.5	11.7

A and C for measurement of non-green roof
B and D for measurement of green roof

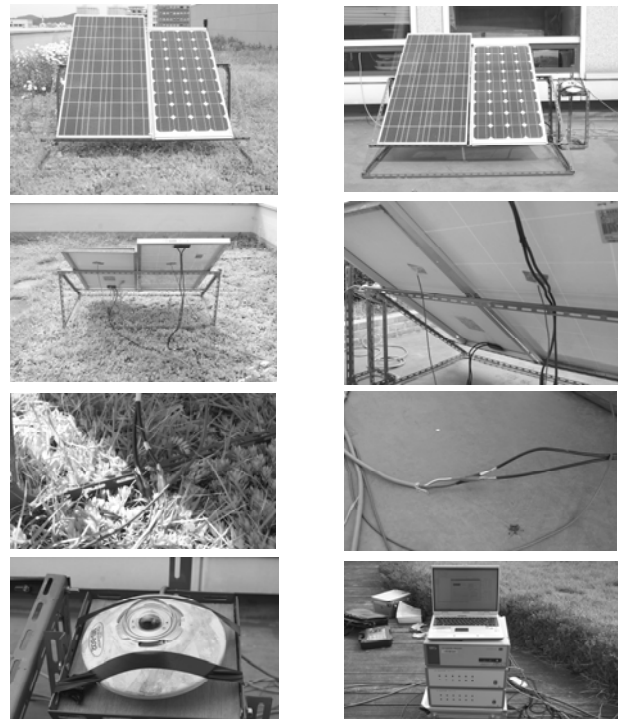


Fig. 4. Measuring apparatus and the scene look

3.3. PV 발전량 측정결과

Table 4에서 나타낸 바와 같이 비 옥상녹화의 다결정 모듈 평균 온도는 31.95℃이며, 옥상녹화의 다결정 모듈 평균온도는 34.76℃이며, 단결정의 경우 비 옥상녹화는 31.92℃. 옥상녹화는 34.76℃로 측정되었다.

단결정과 다결정 모두 옥상녹화에 있는 모듈이 약 2℃ 정도 높게 나왔으며, 4시간 동안 10분 간격으로 측정된 총 발전량은 옥상녹화에 있는 다결정 모듈의 경우 1472.78W, 비 옥상녹화의 경우

1336.29W이고, 옥상녹화에 설치된 단결정 모듈의 경우 912.39W, 다결정의 경우 809.5W로 측정되었다. 발전량의 차이는 다결정의 경우 136.49W, 단결정의 경우 102.89W의 차이를 보였다.

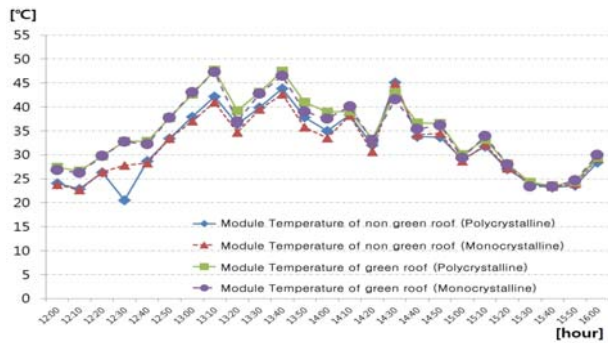


Fig. 5. Module temperature of 9 Oct. on green roof and non green roof

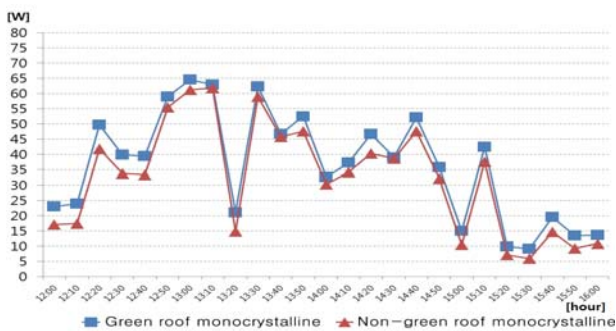


Fig. 6. Difference of electricity generation by Monocrystalline module

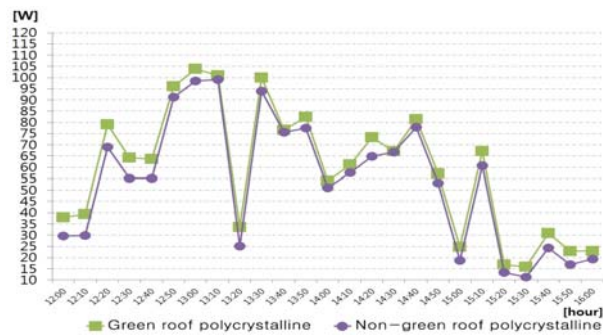


Fig. 7. Difference of electricity generation by Polycrystalline module

Table 4. Difference of temperature and electricity generation in Oct. 9th

	Monocry. T (°C)	Polycry. T (°C)	Monocry. (W)	Polycry. (W)
Non-green roof	31.92	31.95	809.5	1336.29
Green roof	34.79	34.76	912.39	1472.78
Difference	-2.87	-2.81	102.89	136.49

측정 데이터가 선행연구의 결과와 다르게 나타난 이유를 분석하면, 하나는 일반적으로 운량이 3~7이라는 것은 맑은 날에 해당되지만 측정 당일 날씨가 비교적 다른 날에 비해 흐리고(운량 4.4) 바람이 많이 불었던 일기로 인해 PV 발전량 변동의 폭이 큰 것을 Fig. 6, 7에서 볼 수 있다. 또한 그래프에서 측정값이 상·하

로 움직임의 폭이 큰 것은 구름이 해를 가리기도 하고 맑은 순간도 주어지는 등 일사량이 좋지 못했던 상황으로 4시간 동안의 평균 일사량은 약 474W/m² 정도로 측정된 좋은 조건의 날씨는 아니었음을 보여준다. 다른 이유 하나는 옥상녹화가 설치되어있는 장소는 PV 시스템 옆에 낮은 난간이 있어서 좌·우에서 부는 바람을 막아주는 상황으로 녹화면 기온변화에 작용이 미미하였으나, 상대적으로 개방된 비 옥상녹화 지역은 바람이 강해 온도를 낮추는 효과가 있었을 것으로 판단된다.

바람이 없었던 10월 11일의 경우, 시청이 위치한 지역의 최고 기온은 19.1°C이었고 최저 기온은 8.4°C로 평균 기온은 13.1°C, 평균 운량은 1.0이었으며 비가 오지 않는 맑은 날씨로 측정에 적당한 경우였다.

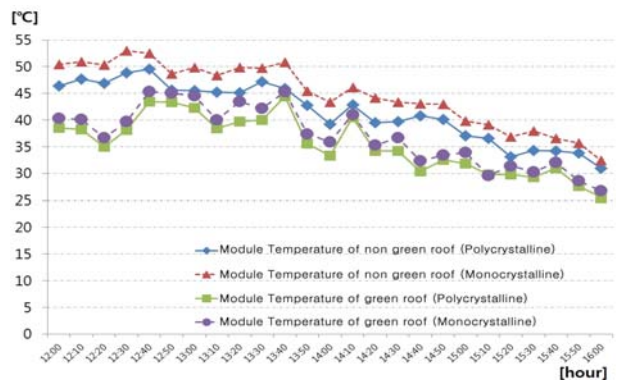


Fig. 8. Module temperature of 11 Oct. on green roof and non green roof

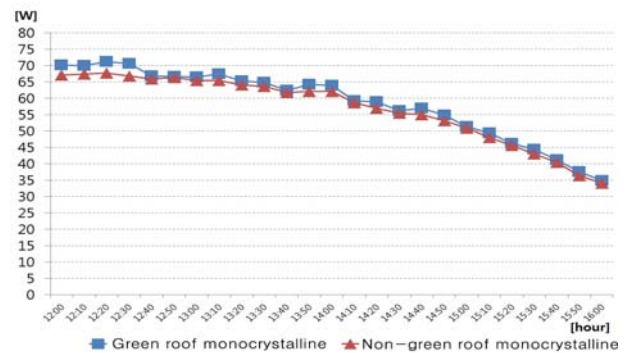


Fig. 9. Difference of electricity generation by Monocrystalline module

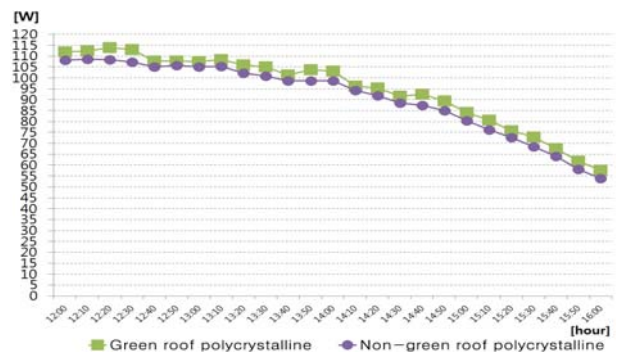


Fig. 10. Difference of electricity generation by Polycrystalline module

Table 5. Difference of temperature and electricity generation in Oct. 11th

	Monocry. T (°C)	Polycry. T (°C)	Monocry. (W)	Polycry. (W)
Non-green roof	44.84	41.56	1425.48	2274
Green roof	37.08	35.47	1462.55	2367.88
Difference	7.76	6.09	37.07	93.88

10월 09일의 데이터와 다른 점은 평균 운량이 1.0으로 구름이 거의 없어서 일사량이 일정하고 바람이 거의 불지 않는 날이었으며, 발전량도 일사량과 마찬가지로 일정한 그래프의 모습을 볼 수 있다.

Fig. 8에서, 측정 한 모듈온도를 비교해 본 결과 비 옥상녹화의 다결정 모듈 평균 온도는 41.56°C이며, 옥상녹화의 다결정 모듈 평균온도는 35.47°C이며, 단결정의 경우 비 옥상녹화는 44.84°C, 옥상녹화는 37.08°C로 측정되었다. 단결정은 약 8°C, 다결정은 6°C 차이가 났으며, Fig. 9, 10에서 보듯이 발전량은 옥상녹화에 있는 모듈이 더 많은 전기를 생산하였으며, 4시간 동안 10분 간격으로 측정한 총 발전량은 옥상녹화에 설치된 다결정 모듈의 경우 2367.88W, 비 옥상녹화의 경우 2274W 발전을 하였고, 옥상녹화와 옥상녹화의 발전량 차이로는 93.88W의 차이를 보였다. 단결정의 경우 옥상녹화의 설치된 경우 1462.55W, 비 옥상녹화의 경우 1425.48W로 37.07W의 차이를 보였다.

이 측정 데이터는 선행연구의 흐름과 비슷하여, 평균 일사량은 889W/m² 으로 9일에 비해 높은 수치로 측정되었다. 옥상녹화에 설치된 PV가 비 옥상녹화의 설치된 PV모듈 보다 본체 온도도 낮고 발전량도 많음이 확인되고 있다.

10월 11일과 거의 비슷한 날씨 인 10월 12일의 기상청 자료를 보면 대전 시청이 위치한 둔산동의 최고 기온은 21.1°C이었고 최저 기온은 5.4°C 평균 기온은 12.8°C, 평균 운량은 1.6이었으며 비가 오지 않는 날씨에 측정을 하였다.²⁰⁾

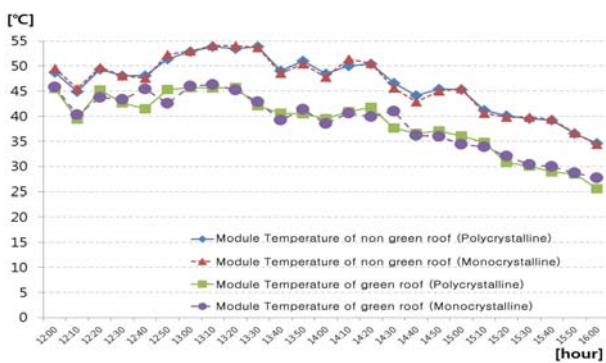


Fig. 11. Module temperature of 12 Oct. on green roof and non green roof

10월 12일의 측정결과 역시 11일 상황과 거의 흡사한바, 비 옥상녹화의 다결정 모듈 평균 온도는 46.65°C, 옥상녹화의 다결정 모듈 평균온도는 38.72°C이며, 단결정의 경우 비 옥상녹화는 46.88°C, 옥상녹화는 38.29°C로 측정되었다. 이는 단결정은 약 8°C, 다결정은 약 7°C 차이가 나는 것이다.

발전량 차이는 Fig. 12, 13에서 보듯이 옥상녹화에 있는 모듈이

더 많은 전기를 생산하였으며, 4시간 동안 10분 간격으로 측정한 단결정 모듈의 총 발전량은 옥상녹화의 경우 1386.19W, 비 옥상녹화의 경우 1303.95W이다. 차이는 82.24W의 차이를 보였으며, 다결정 모듈은 옥상녹화의 경우 2197.13W, 비 옥상녹화의 경우 2085.9W로 측정되어 차이는 111.23W를 보였다.

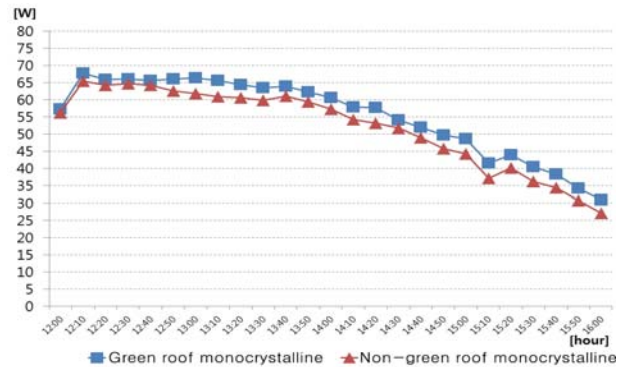


Fig. 12. Difference of electricity generation by Monocrystalline module

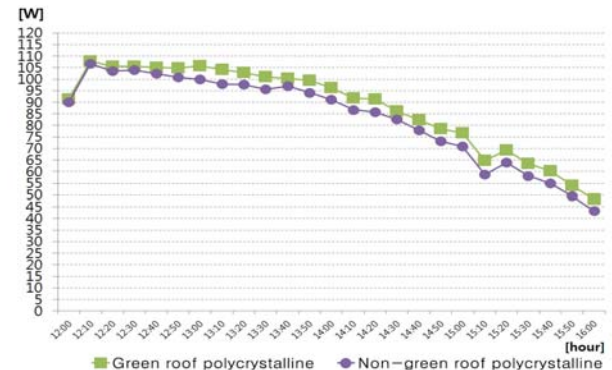


Fig. 13. Difference of electricity generation by Polycrystalline module

Table 6. Difference of temperature and electricity generation in Oct. 12th

	Mono-cry. T (°C)	Poly-cry. T (°C)	Mono-cry. (W)	Poly-cry. (W)
Non-green roof	46.88	46.65	1303.95	2085.9
Green roof	38.29	38.72	1386.19	2197.13
Difference	8.59	7.93	82.24	111.23

이 측정 데이터는 선행연구들의 표면온도 차이 그리고 앞서 11일의 표면온도 차이 및 발전량 데이터와 유사한 사례라고 사료되며, 평균 일사량은 772W/m² 으로 9일에 비해 높고 11일에 비해 약간 떨어지는 수치로 측정되었다. 하지만 일사량이 일정하게 측정되었고, 또한 옥상녹화에 설치된 PV가 비 옥상녹화의 설치된 PV모듈 보다 본체 온도도 낮고 발전량도 많음이 확인 되었다.

이에 3일간의 총 발전량 차이는 옥상녹화의 설치된 다결정 PV가 341.6W, 단결정 PV는 222.2W 더 발전한 것으로 측정되었다. 다결정 모듈의 경우 6.2% 발전량이 증가하였고 단결정의 경우 5.9% 증가하였다.

20) 기상청 날씨 관측자료 10월 12일 측정된 자료

4. 분석

옥상녹화에 설치된 모듈에서 발전량이 더 높게 나온 이유는 PV모듈온도 특성 상 모듈의 온도가 상승하면 발전량이 저하되게 되는데 모듈이 전기를 생산하는 과정에서 자체적으로 발생하는 열과 주변 대기 온도의 상태에 따라 주변에 비해 PV모듈의 온도는 상승하게 된다. 하지만 옥상녹화를 적용함으로써 인해 주변의 기온을 낮추어 모듈의 후면이 콘크리트에 있을 때 보다 낮은 온도로 환기를 시켜주기 때문에 발전량이 증가한 것으로 판단된다.

아래 Fig. 14의 사진을 보면 10월 12일 11시40분 경에 Testo 87521) 열화상 카메라로 촬영한 사진이다. 모듈 온도의 분포를 보면 비 옥상녹화의 모듈 최고온도는 50°C이며, 최소온도는 18.5°C, 평균온도는 36.1°C로 나타났다. Fig. 15는 옥상녹화의 모듈 온도를 촬영한 사진으로서 최고온도가 41°C로 측정됐으며, 최소온도는 18.5°C, 평균온도는 23.6°C로 측정되었다.

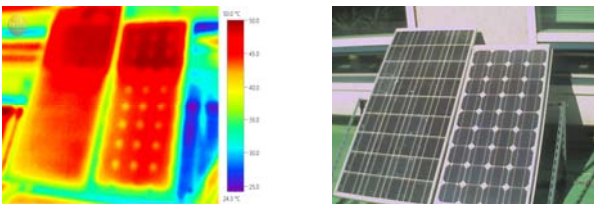


Fig. 14. Surface temperature of modules by thermal imaging Photo (non-green roof)

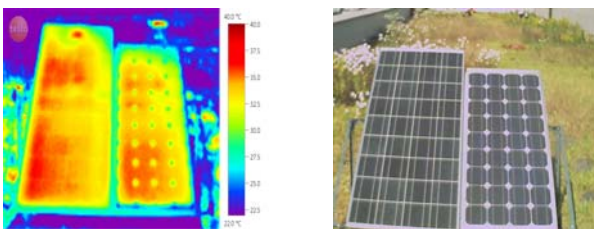


Fig. 15. Surface temperature of modules by thermal imaging Photo (green roof)

이 열화상 카메라 측정 실험으로 옥상녹화가 주변기온을 낮춰 모듈의 온도가 저감된다는 사실이 측정되었으며, 그에 따른 발전량 상승의 원인으로 작용하는 것으로 판단된다.

현재 국내의 평지붕 태양광 시스템 시공은 아래 Fig. 16과 같은 형태로 설치가 되어있는데 옥상에 일부분만 하중을 받거나, 바람이 심하게 불 시 높은 풍압으로 손상위험이 커지는 점과, 건물과의 조화적 완성도에서도 문제일 수 있다.



Fig. 16. A typical PV installation on Flat roof in domestic

이 분야의 선진국인 유럽에서 PV시스템이 설치된 사례를 Fig. 17에서 보면 옥상녹화 위에 PV모듈을 식생층 위에 1단 다열 배열로 낮게 설치하는 모습들을 볼 수 있으며, 이를 통해 구조적으로나 풍하중에 의한 피해 감소 및 미적 완성도를 높이는 건축적 대안을 확인할 수 있다.

결국 Fig. 16의 국내 경우도 가능한 다열 배열이 옥상녹화와 PV 복합시스템의 유지·운영에 유리할 것으로 판단된다.



Fig. 17. Examples of PV installation on green roof in foreign

5. 결론

지속가능한 고효율 친환경 건축의 근간이 되는 고 단열 기법 및 신·재생에너지 적용 분야에 대표적으로 해당되는 건물옥상녹화와 PV시스템을 꼽을 수 있는데 공공건물에 옥상녹화와 PV장치가 복합적으로 설치될 경우, 그 장점과 옥상녹화가 PV발전 효율에 미칠 영향을 분석을 한 결과는 다음과 같다.

- 3일 동안 가장 일사량이 좋은 12시부터 4시까지를 측정 시간으로 선정하여 옥상녹화와 비 옥상녹화 총 발전량을 측정한 결과 옥상녹화 지붕에 설치된 다결정 PV가 341.6W, 단결정 PV는 222.2W 더 발전한 것으로 측정되었다. 그 결과, 옥상녹화에 설치된 다결정 모듈이 6.2% 단결정의 경우 5.9% 발전량이 증가하였다.
- 10월 12일 Testo 875 열화상 카메라로 촬영한 결과 비 옥상녹화의 모듈 최고온도는 50°C이며, 최소온도는 18.5°C, 평균온도는 36.1°C로 나타났으며, 옥상녹화의 모듈온도는 최고온도가 41°C, 최소 온도는 18.5°C, 평균온도는 23.6°C로 측정되었다. 전체적으로 옥상녹화에 있는 모듈의 온도 분포가 낮은 것을 확인할 수 있었다.
- 단기간의 실측을 통한 측정 값과 기상이변으로 인한 실험적 연구의 한계가 있지만, 옥상녹화를 이용하여 공공건물 또는 옥상녹화가 설치되어 있는 장소에 태양광 발전 시스템을 설치할 경우 효율성 증가 가능성을 확인하고자 한 연구 목적처럼 실측 결과 또한 온도 저감효과와 효율 상승이 나타남을 확인할 수 있었다.
- 이론적 고찰의 선행연구의 결과분석과 본 연구의 실측을 통하여 옥상녹화 지붕상부 외기온도는 비 옥상녹화 지붕의 경우 보다 낮게 형성되고 이러한 현상은 PV 발전량 향상과 관계가 있음이 확인되었다.
- 따라서 근래 신·재생에너지 설치 의무화에 따른 공공건물의

21) 독일 TESTO 열화상 카메라, 160 x 120 픽셀 해상도, -20°C~280°C 온도 측정범위(0.08°C 온도분해능)

PV설치에 있어서 옥상녹화 지붕과 복합적용이 이루어지면, 옥상녹화의 직접적인 장점 이외에도 PV효율을 상승시키고 그에 따른 경제성 향상과 CO₂ 감축에도 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

측정기간이 다소 기온이 낮은 추분이라는 계절적 제한을 뛰어넘어 하절기와 동절기에도 옥상녹화와 비 옥상녹화 지붕의 PV 상황에 대하여 장기간의 발전량 측정 비교가 이루어지는 것이 추후 연구의 방향일 수 있다. 결과적으로 한 해 발전량에 관한 상대비교를 통하여 옥상녹화와 PV복합 시스템의 LCC 상관관계 분석이 가능할 것으로 사료된다. 또한 PV시스템 설치 높이에 따라 옥상녹화의 증발산 효과가 어느 높이까지 모듈의 온도저감에 영향을 미치는지 추가 실험이 이루어져 본 연구주제의 완성도를 높이고자 한다.

References

[1] Lee, Doo-Ho and 1 accompanying person, A Consideration on the Surface Temperature Reducing Effect of Green Roof System Flat Roof, Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 12, No. 3, 2012. 06

[2] Park, Seon-Yeong and 4 accompanying person, Effect of Green Roof to Reduce the Electrical Fire, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 8, 2012. 08

[3] Kim, Dae-Wuk and 2 accompanying person, Simulation of Changes in Nearby Thermal Environment According Green Roof in Low-Rise Residential Area of Daegu, Journal of the Korean Housing Association, Vol. 24, No. 3, 2013. 06

[4] Lee, Chun-Woo and 2 accompanying person, A Study on the Analysis of Temperature Reduction Effect by the Type of the Green Roof, Journal of the Korean Housing Association, Vol. 22, No. 3, 2011. 06

[5] Choi, Dong-Ho and 1 accompanying person, An Experimental Study of Surface Materials for Planting of Building Surface by the Radiant Heat Balance Analysis in the Summer, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 3, 2010. 06

[6] Kim, Dae-Hyun and 1 accompanying person, Improving the power of PV module by a surface cooling system, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 6, 2009. 12

[7] Kim, Youn-Sik, A Study on Efficiency Improvement of Solar cell Temperature Dependence, Technology of Future Energy, 2009. 12

[8] Ahn, Tae-Kyung, Evaluation for Thermal Performance of Apartment House Top Floor using Roof Planting, The Society of Living Environment System, 10(3), 2003

[9] Park, Chan-Pil, Study on Improvement of Thermal Environment by Green Roof Systems on RC Building, The Korea Society of Environmental Restoration Technology, 7(1), 2004

[10] Lee Dong-Kun, The Effect of Temperature Reduction as Influenced by Rooftop Greening, The Korea Society of Environmental Restoration Technology, 8(6), 2005

[11] Oh, Seung-Hwan, The Analysis of Temperature Reduction Effect of an Extensive Greenroof, Seoul National Univ., 2006

[12] Kim Ju-Hwan, A Study on the Evaluation of Energy Performance due to the Application of Greenery Cover Method in Education Buildings, Yeungnam Univ., Graduate School, 2009

[13] Kim, Ji-Su, A study on the change of PV efficiency by the reduction effects in temperature of green roof, Semyung Univ., Graduate School, 2011

[14] Sam C. M. and 1 accompanying person, Integration of green roof and photovoltaic systems, Paper submitted to Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Substantiality, 2011. 11

[15] Bruce Dvorak and 1 accompanying person, Rooftop Temperature reduction from unirrigated modular green roofs in south-central Texas, Urban Forestry & Urban Greening, Available online 7 July 2012

[16] Köhler M. and 2 accompanying person, Interaction between PV- systems and extensive green roofs, In Proceedings of the Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, Minneapolis, April 29-May 1, 2007

[17] Deo Parasad and 1 accompanying person, Designing with Solar Power: A Source Book for BIPV, Images Publishing, 2005

Received October 01, 2013;
Final revision received October 17, 2013;
Accepted October 28, 2013