



서울시 햇빛지도 기반의 RPS제도를 고려한 옥상녹화 연계 태양광발전 시스템의 경제성 분석

Economics Analysis of Photovoltaic Power Generation Linked with Green Roof in Consideration of Seoul Solar Map-based RPS

김태한* · 이소담** · 박정현**

Kim, Tae-Han* · Lee So-Dam** · Park Jeong-Hyeon**

* Dept. of Environmental Landscape Architecture, SangMyung University(taehankim@smu.ac.kr)
 ** Dept. of Environmental Resources, Graduate School, SangMyung University(dami7138@naver.com)
 ** Dept. of Environmental Resources, Graduate School, SangMyung University(wb6671@naver.com)

ABSTRACT

In power supply systems for urban areas, issues such as a progressive tax have escalated recently. In this regard, photovoltaic power generation, which is appraised as an alternative power generation system, is drawing attention increasingly for its high stability and applicability to existing infrastructure. This study assessed the realistic feasibility of photovoltaic power generation and also analyzed the economic benefits expected when it is linked with green roof, which is likely to promote ecological functions in urban areas, based on the Seoul solar map, RPS, and actual monitoring data.

The economics analysis of 30kW photovoltaic power generation applied with the monthly average horizontal solar radiation of six grades in the Seoul solar map showed that positive NPV was up to grade 4, while grade 5 or poorer showed negative NPV and indicated that it is difficult to assure appropriate feasibility. Compared with non-afforestation, when green roof was applied, monthly average power improvement efficiency was 7.2% at highest and 3.7% at lowest based on yearly actual monitoring data. The annual average was 5.3%, and the efficiency was high relatively in summer, including September and November. As for the economic benefits expected when 30kw photovoltaic power generation is combined with green roof based on the average horizontal solar radiation of grade 1 in the Seoul solar map, SP has improved 0.2 years to 7.4 years, and EP has improved 0.5 years to 8.3 years.

KEYWORD

햇빛지도
RPS제도
옥상녹화
태양광모니터링
경제성 분석

Solar Map
Renewable Energy Portfolio Standard
Green Roof
PV Monitoring
Economics Analysis

ACCEPTANCE INFO

Received Nov 29, 2016
Final revision received Dec 30, 2016
Accepted Jan 4, 2017

© 2017 KIEAE Journal

1. 개요

최근 폭염으로 높은 전력사용량으로 누진구간이 상향 적용되는 주택용 전력소비의 경우 요금제에 따른 경제적 문제가 가중되고 있다. 특히, “총괄원가” 초과로 산정하고 있는 월 사용량 300kWh의 가구 비중이 1998년 대비 2014년의 경우 5.8%에서 28.7% 증가¹⁾하고 있어 이에 대한 해결방안이 필요한 시점이다.

이와 같은 전력문제를 개선할 수 있는 다양한 해결방안 중에서 태양광발전은 대표적인 분산형 전력생산시스템으로 기존 건물에 대한 적용성과 안정성을 확보하여 신·재생에너지 확산정책에 활발히 도입되고 있다. 서울시의 경우 건물과 연계된 소규모 태양광발전설비인 햇빛발전소를 중심으로 한 “원전하나줄이기”를 통해 대체전력생산에 대한 대안을 제시하고 있다. 여기에 2012년부터 정부의 일괄적인 발전차액지원제도(FIT: Feed in Tariff)

가 신·재생에너지 의무할당을 주요 국내발전사업자가 담당하는 공급의무화(RPS: Renewable Energy Portfolio Standard)제도로 개편되면서 정책, 기술, 경제 측면의 포괄적인 이해에 요구되고 있다. 한편, 태양광발전의 경제성 연구는 신·재생에너지 확산에 필요한 주요 주제로 논의되고 있으며, 옥상녹화를 통한 열섬 효과 및 내수피해저감 등과 같은 도시의 생태적 기능성 증진 연계 연구도 폭넓게 진행되고 있다.

우선, 태양광발전의 경제성 분석 연구는 대학 건물 내 태양광발전 설비 설치에 따른 경제성을 NPV로 해석한 연구(차다운 외 1, 2014), 건축외장재로서의 PV 시스템에 대한 경제성과 보조금 정책에 관한 연구(양혜숙 외 1, 2014), 국내 태양광 발전소의 지역별 이용률 및 경제성을 검토한 연구(이강훈 외 1, 2015) 등이 보고되고 있다.

반면, 옥상녹화의 생태적 기능인 온도 저감효과와 연계된 태양광발전 성능 연구는 공공건물 옥상녹화와 태양광발전 간의 효율 향상에 관한 상관성 연구(이웅직, 2013), 옥상녹화의 기온저감효과가 PV모듈 발전량에 미치는 영향에 대한 연구(유동철 외 1, 2012), 옥상녹화와 연계된 태양광발전의 출력모니터링 기반 성

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
 http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2017.17.1.077

1) 조성진 외 1, 주택용 전력수요의 계절별 가격탄력성 추정을 통한 누진요금제 효과 검증 연구, 에너지경제연구원, 2015

능평가연구(김태한 외 1, 2015) 등이 보고되고 있다.

상기 선행연구는 태양광발전의 경제성을 다면적으로 해석하고, 녹화에 따른 태양광발전의 단기간 전력개선효과를 규명하는 모니터링 연구가 주를 이루었다. 반면, 장기간 모니터링 기반의 녹화를 통한 전력변환효율 개선효과 규명과 태양광발전연계에 따른 경제적 관점의 포괄적 분석연구는 보고되고 있지 않다.

따라서 본 연구는 대안적 전력 문제결방안인 태양광발전의 현실적인 사업성 평가와 더불어 도시의 생태적 기능성 증진이 가능한 옥상녹화와 연계할 경우 기대할 수 있는 경제적 차익을 제시하려 한다. 이에 대한 객관성 확보를 위해 서울시 햇빛지도, RPS제도 및 장기간 실측 모니터링 자료를 연동한 복합적 관점의 경제성 분석을 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 신·재생에너지 공급의무화(RPS)제도²⁾

2012년부터 시행중인 “신·재생에너지 공급의무화(RPS)” 제도는 500MW 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에 한하여 총 발전량의 일정비율 이상을 신·재생에너지를 이용하여 공급하도록 의무화한 제도이다. 현재 총 18개사의 공급의무자를 대상으로 2024년 이후에는 총 발전량의 10%를 신·재생에너지로 생산하거나 공급인증서(REC: Renewable Energy Certificate)를 구매하여 충당해야 한다.

태양광의 경우 별도의 의무공급량이 2015년까지 고려되었으나 현재 비태양광과 통합 운영되고 있으며, 지자체별 인센티브제도가 병행되고 있다. 여기서, 일반 태양광발전사업자의 발전 수익원은 REC, 계통한계가격(SMP: System Marginal Price)의 합과 개별 인센티브에 준한다.

1) 신·재생에너지 공급인증서(REC)

REC는 발전사업자가 신·재생에너지 설비를 이용하여 전기를 생산·공급하였음을 증명하는 인증서로, 공급의무자는 의무공급량 미 이행분을 REC 구매로 충당할 수 있다. 그리고, REC 발급 대상설비에서 공급되는 MWh기준의 신·재생에너지 전력량에 대해 가중치가 부여되며, 본 연구에서는 “3,000kW 이하의 태양광발전 시공을 건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우”에 해당하는 가중치 1.5가 적용된다. 본 연구의 REC 단가는 <Table 1>과 같이 한국전력거래소(KPX: Korea Power Exchange) 2016년 6월 기준 1년간의 요율이 반영되었다.

Table 1. REC: Renewable Energy Certificate, KPX (July 2015~June 2016) unit: KRW/MWh

2015/month	REC	2016/month	REC
Jul	92,894.00	Jan	111,000.00
Aug	92,645.00	Feb	166,800.00
Sep	92,445.00	Mar	100,800.00
Oct	91,061.00	Apr	107,570.00
Nov	93,228.00	May	124,220.00
Dec	95,839.00	Jun	119,560.00

2) 한국에너지공단, 신재생에너지센터 RPS제도 설명 및 안내

2) 계통한계가격(SMP)

SMP는 시간대별로 계산되는 전력거래가격으로 전력수요에 대한 가중평균으로 산출된다. 한국전력공사(KEPCO: Korea Electronic Power Corporation)에서 제공되는 월 가중평균 SMP는 산업부고시 제2014-246호에 의거 전기판매사업자가 전기공급자에게 지급할 요금산정 및 발전차액 지원금 산정 등에 사용되고 있다.

Table 2. SMP: System Marginal Price, KEPCO (July 2015~June 2016) unit: KRW/Wh

2015/month	SMP	2016/month	SMP
Jul	81.99	Jan	90.77
Aug	88.59	Feb	87.62
Sep	90.98	Mar	87.31
Oct	98.34	Apr	75.38
Nov	94.93	May	68.78
Dec	95.46	Jun	65.31

본 연구에서는 <Table 2>와 같이 2016년 6월 기준 1년간의 월 가중평균 SMP가 적용되었다.

3) 송전단가

상기 REC, SMP 조건에 태양광발전 시공을 건축물을 이용하는 경우의 가중치 1.5를 적용하여 태양광 발전사업의 매출액을 다음과 같이 정리할 수 있으며, 본 연구의 월별 송전단가는 <Table 3>과 같이 산출하였다.

$$\text{연 매출액} = \text{발전량} \times \text{SMP} + (\text{REC} \times \text{가중치}) \dots \dots \dots \text{①}$$

Table 3. Electricity Export Rate, unit: KRW/MWh

2015 month	Electricity export rate	2016 month	Electricity export rate
Jul	139,422.99	Jan	166,590.77
Aug	139,056.09	Feb	250,287.62
Sep	138,758.48	Mar	151,287.31
Oct	136,689.84	Apr	161,430.38
Nov	139,936.93	May	186,398.78
Dec	143,853.96	Jun	179,405.31

2.2. 지자체 인센티브

『서울특별시 에너지 조례』 제 25조 및 『서울특별시 기후변화기금의 설치 및 운용에 관한 조례』 제 6조의 규정에 의하여 2016년부터 서울형 발전 차액 보조금 지원 계획이 공고되었다. 지원규모는 2016년도 예산 8억 원으로 누적 설비용량 10MW까지 보조되며 생산 발전량 1kWh당 100원의 발전차액이 지급되고, 합산용량 100kW까지 가능하다. 지원기간은 최초 지급개시 월로부터 60개월 간 지원된다

2.3. 서울시 햇빛지도³⁾

2013년 5월부터 민간에 제공 중인 서울시 햇빛지도는 관내 모

3) 서울시 햇빛지도 <http://solarmap.seoul.go.kr/index.do>

Table 4. Daily Horizontal Solar Radiation of "Seoul Solar Map" unit: kWh/m²/day

Solar Grade	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Grade 1	2.23	3.23	5.03	5.92	6.85	7.23	6.89	6.50	5.35	3.60	2.37	1.53
Grade 2	1.76	2.66	4.77	5.52	6.50	6.83	6.53	6.11	4.40	3.06	1.87	1.19
Grade 3	1.61	2.38	4.39	5.07	5.97	6.23	6.00	5.58	4.00	2.77	1.67	1.10
Grade 4	1.42	2.04	3.87	4.47	5.26	5.43	5.29	4.87	3.47	2.39	1.40	0.97
Grade 5	1.13	1.50	3.10	3.57	4.19	4.23	4.23	3.81	2.67	1.81	1.00	0.77
Grade 6	0.47	0.57	1.29	1.48	1.74	1.72	1.76	1.55	1.07	0.71	0.37	0.32

든 건물을 대상으로 태양광발전 시설 설치 시 예상되는 발전용량을 제공해 주는 정보 서비스이다. 한국에스티지와 새한항업 컨소시엄으로 구축된 해당 서비스는 대상지와 주변 건물 간의 영향을 고려하여 지붕 및 옥상 표면에 입사되는 잠재적인 태양광에너지를 서울시 전역(605km²)을 대상으로 DB화 한 것을 특징으로 한다.

여기에 사용된 태양광에너지 산출 알고리즘은 ESRI사의 ArcGIS® Solar Radiation Tool로 뉴욕, 보스턴, LA 등의 Solar map service 구축에 적용된 검증된 솔루션이다. Solar Radiation Tool 알고리즘은 전체 태양광 중 비중이 가장 낮은 반사광을 제외한 직사광 및 산란광을 고려하여 일사량(Wh/m²)을 계산한다. 또한, Hemispherical Viewshed Algorithm을 기반으로 하여, 관측지점에서 관찰되는 천구를 격자형 이미지로 표현하여 시각적 음영을 산출하여 나타내는 방법이 적용된다.

햇빛지도는 햇빛 주제도 조화를 통해 월별 평균 수평일사량을 총 6등급으로 분류하고 있으며, <Table 4>는 이에 대한 등급별 평균 태양광에너지를 NASA Satellite Meteorological Data 포맷으로 월별 정리한 자료이다.

3. 연구내용 및 방법

3.1. 태양광 순간전력 모니터링

1) 실험지 개요

녹화에 의한 태양광 발전효율 개선효과 실측모니터링을 위해 KD Power, eKEN820 원격접속 시스템을 기반으로 <Table 5>와 같이 녹화가 적용된 실험구와 비녹화 옥상공간의 대조구에 수평면일사량(W/m², SP-110), 순간전력(kW) 등을 측정할 수 있는 센서 네트워크를 구축하였다.





Figure 1. Experimental and Control Testbed

실험구는 <Figure 1>과 같이 펠라이트, 코코피트, 혼합유기물로 조성된 인공토양 100mm의 녹화유니트에 섬기린초, 금강에기린초, 흰꽃세덤, 분홍세덤 등을 구축하고, 대조구는 우레탄방수도막의 기존 옥상표면에 태양광발전설비를 조성하였다.

2) 모니터링 조건

상기 실험구 및 대조구에 구축된 센서 네트워크를 통해 2015년 월별 일사량이 양호한 날을 중심으로 3일간 녹화에 따른 태양광 발전효율 개선효과를 도출하였다. 실측기간 동안 일사집중시간을 10시에서 14시로 설정하고 수평면 일사량과 인버터의 에러율과 손실율을 배제하기 위해 순간전력을 10분 단위로 측정하였다.

Table 5. Measuring Equipment of PV Monitoring System

measuring equipment	performance index
Pyreheliometer	 <p>Typical sensitivity : 20 μV (W/m²) Measuring field: : 0~ 2000 W/m² Spectral range: : 400 nm ~ 1100 nm Response time: : 0.5 sec Non linearity : 1 % Temperature drift: : <±0.15%/°C Calibration uncertainty: < 3% Working temperature: : -40°C~ 65°C</p>
LPsiliconpyra -04	
Monitoring, DB capture, Power meter	 <p>Grid connected (uninsulated) Size: 900mm × 900mm × 1400mm PV Operating voltage range: 120~500VDC PV Maximum input current: 17A AC Rated operating voltage: 220VAC AC Rated operating frequency: 60Hz Working temperature: -20°C~40°C</p>
KPVH-F-002	

3.2. 전산모의 모형

1) 태양광발전시스템 모델

서울시에 적용되는 태양광발전시스템의 경제성 분석을 위한 전산모의는 RETScreen 모형을 사용하였으며, 발전용량을 30kW로 설정하고 15.6% 효율의 Samsung 단결정 실리콘 모듈인 LPC250SM을 선정하였다. 태양광모듈의 경사각은 국내 중부지역 위도를 감안하여 30°로 하고, 태양추적모드는 고정형으로 선택하였다. 구체적인 시스템 모델의 사양은 <Table 6>과 같다.

Table 6. Properties of PV System

PV panel	
Type	mono-si
Power capacity	30.00kW
Manufacturer	Samsung
Model	LPC 250SM
Efficiency	15.6%
NOCT(°C)	45°C
Temperature coefficient	0.40%
Solar collector area	192m ²
Solar tracking mode	fixed
Miscellaneous losses	3.8%
Slope(°)	30.0
Inverter	
Efficiency	95.0%
Capacity	1.0kW
Miscellaneous losses	3.8%

2) 재정분석조건

경제성 분석을 위한 재정모델은 본 연구의 태양광발전 모의에 사용된 RETScreen 모형에 사용되는 Brealey와 Myers (1991), Garrisonetal.(1990)등이 정의한 금융표준모델에 따라 초기투자비용이 발생하는 시점을 0년, 현금유동 시기는 연말, 경제활동에 따른 인플레이션은 1년부터 적용하였다.

주요경제지표를 소비자물가 지수 1.2%⁴⁾, 에너지비용 상승률⁵⁾2.4%, 할인율⁶⁾ 2.37%로 조정되었고, 태양광발전 판매단가 상승률은 소비자 물가지수에 준한 1.2%로 설정하였다. 모의기간은 태양광모듈 평균수명에 준한 20년으로 한정하고, 2016년부터 시행되는 서울형 발전 차액 보조금 지원 인센티브를 5년 동안 제공하였다. 태양광설비 설치비용은 초기투자비용에 포함하고, 연간 정기, 비정기적으로 발생하는 유지관리 비용 등은 본 모의과정에서는 제외되었다.

Table 7. Unit cost of proposed model

components	num.	unit cost(KRW)	total cost(KRW)
PV Panel: 250Wp	120	225,000	27,000,000
TCS Inverter, 33kW	1	14,300,000	14,300,000
Connector Band 8CH	1	9,120,000	9,120,000
Labor Expenses	-	8,563,246	8,563,246
Monitoring System	1	5,273,200	5,273,200
PV Structure	-	16,486,484	16,486,484
Wiring Material	-	6,350,639	6,350,639
IVA	-	8,709,357	8,709,357
total cost (IVA incl.)	-	-	95,802,926

단가산정은 국내 태양광시공 전문업체인 K사의 20kW 태

4) 2016.09 기준 통계청 소비자물가상승률, KOSIS
 5) 전력가격 상승률(2000~2012), 박광수, 에너지 가격체계 왜곡의 파급효과, 에너지경제연구원, 2013
 6) 한국은행 기준금리(2010~2016), <http://www.bok.or.kr>

양광설비의 원가계산서를 참조하였으며, 단가는 부가가치세를 포함하고 있다. 여기서 기술개발비, 연구비 등의 제품개발비용은 제외되고, 구체적인 내역은 <Table 7>과 같다.

3)재정분석모형

재정분석은 내부수익률(Internal Rate of Return), 단순투자회수(Simple Payback), 자기자본회수(Equity Payback), 순 현재가치(Net Present Value)로 구분되어 이루어진다.

우선 내부수익률(IRR)은 순 현재가치(NPV)가 0이 되는 할인율을 의미하며, 여기서 N 은 연간단위의 프로젝트 주기, C_n 은 n 년 동안의 현금흐름, IRR 은 내부수익률을 나타낸다. (식 ②)

단순투자회수(SP)는 채무 및 자기자본을 포괄하는 총투자비용이 이익으로 회수되는 시간을 연 단위로 산출하며, 여기서 SP 는 단순투자회수, C 는 프로젝트 총 초기투자비용, IG 는 장려금과 보조금을 의미한다. C_{ener} 은 연간에너지절약 또는 수입, C_{capa} 는 연간 용량절약 또는 수입, C_{RE} 는 연간 재생에너지생산량을 나타낸다. C_{OM} 은 청정에너지 프로젝트에 소요된 연간 사업비용 및 유지관리비용, C_{fuel} 은 연간 연료 또는 전력비용을 나타낸다. (식 ③)

자기자본회수(EP)는 프로젝트가 흑자 전환되는 첫해를 기점으로 하는 현금흐름을 산출하며, 여기서 N_{PCF} 는 프로젝트의 흑자전환 첫해, C_n 은 n 년의 세후현금흐름을 나타낸다.(식 ④)

마지막으로 순 현재가치(NPV)모델은 프로젝트의 사업가치를 최초투자로부터 모의종결시점까지 연도별 손익을 현재가치로 환산하여, 양수와 음수의 결과에 따라 투자가치의 유무를 평가한다. 여기서 NPV 는 순 현재가치, C_n 은 n 년의 세후 현금흐름, r 은 할인율을 의미한다. (식 ⑤)

$$0 = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + IRR)^n} \dots\dots\dots ②$$

$$SP = \frac{C - IG}{(C_{ener} + C_{capa} + C_{RE}) - (C_{OM} + C_{fuel})} \dots\dots ③$$

$$0 = \sum_{n=0}^{N_{PCF}} C_n \dots\dots\dots ④$$

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + r)^n} \dots\dots\dots ⑤$$

4. 연구결과

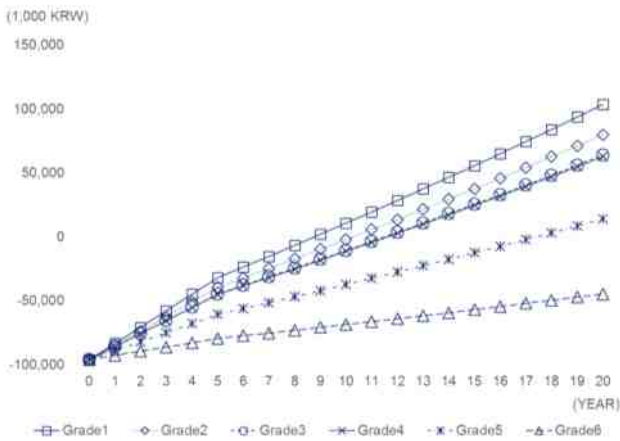
4.1. 햇빛지도 등급별 경제성 분석

서울시 햇빛지도의 6개 등급 월별 태양광에너지를 상기 태양광발전 모델, 재정분석조건에 적용하여 다음결과를 도출하였다. SP가 10년 미만인 경우는 9.6년을 기록한 4등급까지였고, 5등급은 13.9년, 6등급은 29.7년을 기록하였으며, EP가 10년 미만인 경우는 1등급 8.8년이 유일하였다. 투자가치의 유무를 판단할 수 있는 NPV 양수구간은 35,372,821원을 기록한 4등급까지였고, 5등급은-4,875,510원, 6등급은-53,324,736원을 기

Table 8. Financial Viability of "Seoul Solar Map" Model

Financial Viability	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Grade 6
Internal Rate of Return(%)	9.1	7.5	5.9	5.8	1.4	-5.5
Simple Payback(year)	7.6	8.7	9.5	9.6	13.9	29.7
Equity Payback(year)	8.8	10.2	11.5	11.6	17.4	>
Net Present Value(KRW)	69,261,651	49,632,016	36,409,136	35,372,871	-4,875,510	-53,324,736
Annual life cycle savings(KRW)	4,235,815	3,035,331	2,226,663	2,163,289	-298,170	-3,261,166
Benefit-Cost ratio	1.72	1.52	1.38	1.37	0.95	0.44

록하였다. 다음 <Figure 2>와 같이 5년 동안 지원되는 서울형 발전 차액 보조금으로 인하여 모든 등급이 5차년까지 상대적으로 높은 투자회수가 이루어졌으나, 인센티브종료 후에는 완만한 회수로 전환되었다. 자세한 누적현금흐름 분포는 <Table 8>과 같다.



<Figure 2> Cumulative Cash Flows of "Seoul Solar Map" Model

4.2. 옥상녹화 적용 전력개선효과

동일한 태양광발전설비에 녹화가 적용된 실험구와 일반 옥상동일한 태양광발전설비에 녹화가 적용된 실험구와 일반 옥상발전의 연간 월평균 전력개선효율을 도출하여 가중평균으로 정리하였다.

우선 <Figure 3>과 같이 일조집중시간 동안 최대 개선효율은 3일간 평균 7.2%를 기록한 9월이었고, 최소 개선효율은 3일간 평균 3.7%를 기록한 1월이었다. 최대, 최소 개선효율을 기록한 9월과 1월의 실험구와 대조구간 광환경의 차이는 최대 0%에서최

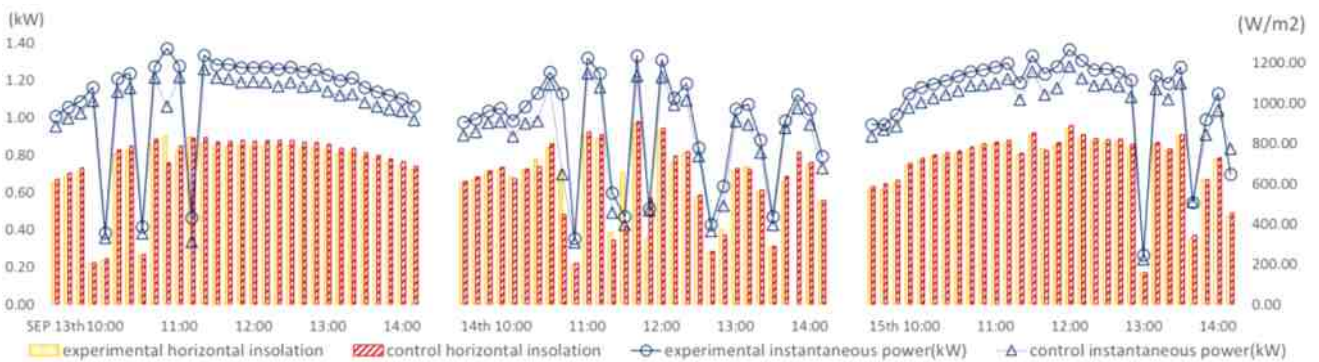
소 -3%로 대조구 일사량이 소폭 높은 유의한 실험 환경조성을 확인할 수 있었다. 최대 일평균 전력개선효율은 9월 8.6%, 1월 3.9%를 기록하였으며, 최소 일평균 전력개선효율은 9월 6.1%, 1월 3.5%를 기록하였다. 또한, <Table 9>와 같이 연간 평균 전력개선효율은 5.3%로 9월, 11월을 포함한 하절기에 상대적으로 높은 효율이 확인되었다

4.3. 옥상녹화적용에 의한 경제성분석

서울시 햇빛지도 중 가장 높은 경제성 확보가 가능한 1등급을 기준으로 옥상녹화 적용여부에 따른 월별전력개선효율을 고려하여 녹화로 인한 경제적 효과를 다음과 같이 분석하였다. 일반 옥상 대비 옥상녹화로 인한 SP는 0.2년 개선된 7.4년이었으며, EP는 0.5년 개선된 8.3년으로 산출되었다. NPV는 옥상녹화 시나리오가 일반옥상에 비해 7,686,999원의 추가적 가치가 부가되었으며, 모두 양수구간을 기록하였다. 자세한 누적현금흐름 분포는 <Table 10>과 같다.

Table 10. Financial Viability of Scenarios

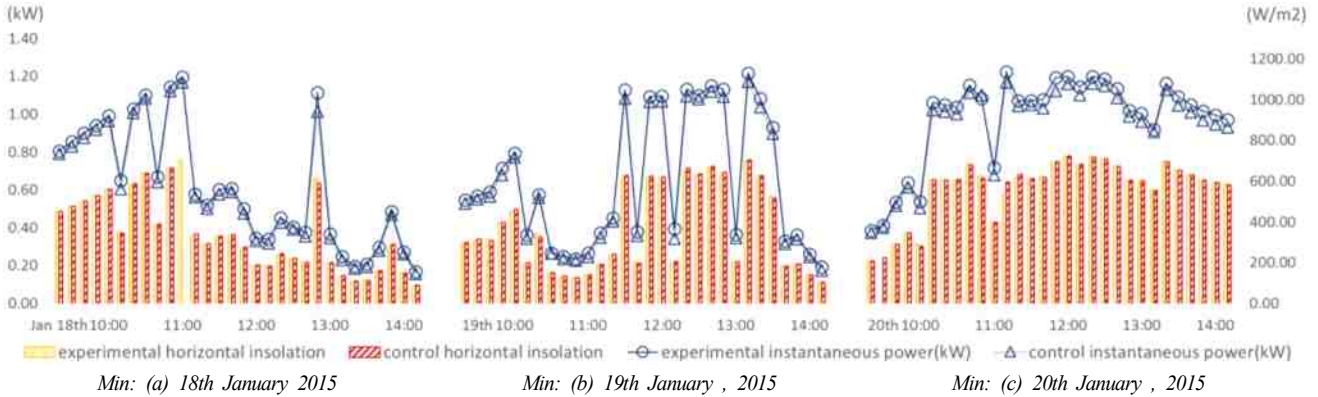
Financial Viability	Conventional PV	Green Roof Integrated PV
Internal Rate of Return(%)	9.1	9.7
Simple Payback(year)	7.6	7.4
Equity Payback(year)	8.8	8.3
Net Present Value(KRW)	69,261,651	76,948,650
Annual life cycle savings(KRW)	4,235,815	4,705,927
Benefit-Cost ratio	1.72	1.80



MAX: (a) 13th September, 2015

MAX: (b) 14th September, 2015

MAX: (c) 15th September, 2015



<Figure 3> Maximum and Minimum Value of Electricity Efficiency Improvement between Experimental and Control Testbed

Table 9. Electricity Efficiency Improvement between Experimental and Control Testbed (January ~ December, 2015) unit: %

month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	avg.
electricity efficiency improvement	3.7	4.7	3.6	5.5	5.2	6.3	6.1	6.4	7.2	4.5	6.6	4.5	5.3

5. 결론

본 연구는 전력문제의 효율적인 해결방안인 태양광발전의 생태적 기능성 개선을 기대할 수 있는 옥상녹화 연계 태양광발전 시스템의 경제성에 대하여 서울시 햇빛지도, RPS제도 및 실측 모니터링 자료를 기반으로 분석하였으며, 다음과 같이 연구결과를 정리할 수 있다.

1) 서울시 햇빛지도의 6개 등급의 월별 평균수평일사량을 적용한 30kW급 태양광발전시스템에 대한 경제성 분석 결과, 투자 가치 유무를 판단할 수 있는 NPV의 양수구간은 4등급까지였고, 5등급 미만은 음수구간에 해당하여 적정한 사업성을 확보할 수 없는 것으로 해석되었다.

2) 비녹화 대비 옥상녹화를 적용한 경우 전력개선효율이 실측 모니터링으로 확인되었고, 월별 평균 전력개선효율이 최대 7.2%, 최소 3.7%이었으며, 연간 평균 5.3%로 9월, 11월을 포함한 하절기에 상대적으로 높은 효율을 기록하였다.

3) 서울시 햇빛지도 1등급의 평균수평일사량을 기준으로 30kW급 태양광발전과 옥상녹화를 연계할 경우 기대할 수 있는 경제적 차익은 SP가 0.2년 개선된 7.4년이었으며, EP는 0.5년 개선된 8.3년으로 산출되었다.

본 연구를 통해 현실적인 모의를 위해 현재 사용 중인 객관적 광자원 자료, 정책 및 실측 데이터를 기반으로 광자원 등급에 따른 경제성과 태양광발전과 옥상녹화의 연계 시 예상되는 전력개선효과를 산출하였다.

연계시스템의 경우 녹화로 인한 주변기온 조절효과가 결정질 태양전지 표면온도를 저감하여 최대 7%이상의 전력개선효율을 기대할 수 있었으나, 동절기 및 간절기에 상대적으로 낮은 개선효율로 인하여 직접적인 경제성 확보는 부족한 것으로 해석되었다.

따라서, 경제성 관점의 기술적 최적화 방안을 제시하기 위해 연중 일사량이 가장 많은 하절기에 결정질 태양광모듈 표면 온도 조절을 녹화와 연동할 수 있는 BOS(Balance of System)

의 전력개선효율 증진 방안과 분석에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 모니터링 및 분석의 추가적인 객관성 확보를 위해 지역과 기간 등의 제한된 실험환경 한계도 보완되어야 할 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 2015학년도 상명대학교 교내연구과제지원으로 수행되었음.

Reference

- [1] 김태한, 박상연 “표면온도 알고리즘을 통한 옥상녹화통합형 태양광발전시스템의 출력 모니터링 연구” 한국생태환경건축학회 Vol. 15, No. 1, 2015.
- [2] 양해숙, 윤혜경 “건물 외장재로서의 PV 시스템의 경제성 및 보조금 정책 분석” 대한건축학회 논문집-계획계 Vol.30, No. 4, 2014.
- [3] 이지희, 조한보, 김태한 “스마트 가로등 시스템을 적용한 수인형 도시공원모델에 관한 연구” 한국조경학회지 Vol. 40, No. 4, 2012.
- [4] 이웅직 “공공건물 옥상녹화와 설치태양광(PV)의 효율향상 상관관계 연구” 한국생태환경건축학회 논문집 Vol.13, No.5 2013
- [5] 이강훈, 원동준 “국내 태양광 발전소의 지역별 이용률과 경제성 검토” 한국신재생에너지학회 Vol.2015 No.11. 2015
- [6] 유동철, 이웅직 “옥상녹화가 PV모듈 발전량에 미치는 영향 고찰” 한국태양에너지학회 Vol.32 No.2 2012
- [7] 차다운, 김성열 “NPV 분석을 통한 대학 내 태양광 설비 연계의 경제성 분석” 대한전기학회 학술대회 논문집 Vol.2014, No. 7, 2014.
- [8] 황해미, 소정훈, 유권중 “RPS와 연계한 태양광발전소의 운영 및 경제성 분석 방안” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol.2010. No.7 2010
- [9] C. Cristofari, P. Poggi, G. Notton and M. Muselli, Thermal modelling of a photovoltaic module, Proceedings of Sixth IASTED International Conference on "Modelling, Simulation and Optimization", Gaborone, Botswana, 2006,pp.273-278.
- [10] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Fuyuki and K. Kurokawa, Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature, Solar Energy Materials and Solar Cells 75,2003, pp.665-671.
- [11] S. D. Hendire, Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors, Proceedings of ISES Solar World Congress, Atlanta, GA, 1979, pp. 1865-1869.
- [12] T. T. Chow, W. Heand J. Ji, Hybrid photovoltaic-thermo syphon water heating system for residential application, Solar Energy 80, 2006,pp.298-306.