

단지형 건물군 내 태양광 패널의 사후 평가를 통한 발전 효율 연구 - S대학의 연간 발전 실적을 중심으로 -

김희진¹ · 정혜진*

¹서울대학교 자유전공학부

A Study on Power Generation Efficiency through the Post Evaluation of Photovoltaic Panels in Complex Type Buildings - Focused on Annual Generation Performance of S-university -

Kim, Heejin¹, Jung, Hyejin*

¹College of Liberal Studies, Seoul National University

Abstract : The purpose of this study is to analyze the efficiency of PV according to installation condition in the complex type buildings. For this purpose, annual performance of solar power generation in a certain area was investigated and various methods were conducted including post operation evaluation. In addition, we tried to find out influencing factors that affect the efficiency and sought to identify their relative impact of degree through the data analysis and site visits together. In the middle of this process we can draw up major considerations for the efficient photovoltaic power generation installation. In the mean while, previous studies are making something new related with method for efficiency enhancement and individual influential factors based on experimental environment rather than the empirical data site based. As a result of the study, it was confirmed that even if installed in the same area, the power generation efficiency is 1.5 times as high as the installation condition. Furthermore, statistical analyses were performed on azimuth, tilted angle and shade, which are variables affecting conversion efficiency, and it was statistically confirmed that all variables are meaningful factors that affect the conversion efficiency which is a dependent variable. The most influential factor is the azimuth, followed by the tilted angle and the shade factor. From this result, we expect to be able to provide installation guidelines for the solar power generation equipments on the rooftop zone.

Keywords : PV Facility, Solar Power Generation, Post Evaluation, Conversion Efficiency, Power Generation Efficiency

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

신재생에너지 의무사용 정책(RPS; Renewable Portfolio Standard)과 신재생에너지 공공기관 설치의무화제도 등이 시행된 이후 국내 태양광 산업 또한 빠르게 성장하고 있다. 2011년 79MW에 불과했던 신규 보급용량이 2015년에는 1,134MW로 확대가 되었으며, 태양광에너지를 통해 누적 3,980MWh의 에너지가 생산되었다(Korea Energy Agency,

2016). 또한 2차 국가에너지기본계획에 따라 2035년까지 태양광에너지 발전량이 신재생에너지 전체 발전량의 22%를 담당할 수 있도록 할 계획이며, 세부적으로 2020년 공공기관 건축물의 신재생에너지 공급의무비율 목표를 예상 전력사용량의 20%에서 30%로 상향하고 연도별 비율도 단계별로 확대할 예정이다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2014). 따라서 향후에는 태양광 발전 도입 물량이 폭발적으로 증대될 것으로 예상되며, 신재생에너지에 의한 발전 비율은 지속적으로 상승될 것으로 기대된다. 하지만 태양광 발전 설비 도입이 꾸준히 늘어나면서 시스템 운영에 대한 실무적인 고민 또한 나타나고 있다. 공공기관의 경우 공급의무비율 목표를 만족하기 위하여 한정된 옥상 공간에 태양광 모듈들을 집약적으로 설치하는 관계로 최적의 방위각과 양각, 모듈간의 이격거리를 지키기가 어려우며 그 결과 초기 설치 시 기대했던 발전 성능이 나오지 않는 경우가 종종 발생하고 있기 때

* Corresponding author: Jung, Hyejin Asian Institute for Energy, Environment and Sustainability, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea
E-mail: jhj2005@snu.ac.kr
Received May 29, 2017; revised August 2, 2017
accepted August 3, 2017

문이다(Yang, 2014).

본 연구는 이처럼 태양광 발전 도입이 늘어나는 시점에서 기존에 설치되어 운영되고 있는 태양광 발전 설비의 운영 현황을 진단하고, 특히 동일 지역 내 기상 요인이 동일한 단지형 건물 군 내 태양광 패널의 설치 여건이 태양광 발전에 미치는 영향을 탐구하고자 한다. 기존 연구는 특정한 입지와 기상요인 등이 발전시설의 효율에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 분석하는 기술적인 측면의 효율 향상 연구가 주를 이루고 있다. 또한, 설비적 요인으로 분류되는 양각, 방위각에 대해서는 발전량에 가장 긍정적인 영향을 주는 수준을 찾고 최적의 설치 여건을 도출하고자 하는 시도들이 있었다. 그러나 이러한 실험들은 실측자료의 한정성 또는 단순 모델링 등의 방법론을 활용하여 제한적 실험의 결과를 담고 있으며 실험 환경이 아닌 실제 환경에서 운영된 결과물을 통한 실증적 접근은 이루어지지 않았다. 즉, 대부분의 연구에서는 실험 설계를 통해 개별 변인의 변화에 따른 종속변수의 변화정도를 도출하여 요인 각각에 대한 개별적인 영향도를 파악하는 추세를 보이고 있다.

이에 본 연구에서는 지리적 요인과 기상요인을 통제변인으로 두고 발전 효율에 차이가 나는 실증 사례 분석을 통해 어떠한 설치 여건이 발전효율에 의미 있는 영향을 미치는지 분석하고자 한다. 이 같은 태양광 발전 사후 평가를 통해 관련 설비 설치 시 고려해야 할 효과적인 환경 구성 요건을 찾고자 한다.

본 연구의 진행과정은 다음과 같은 절차를 따르고 있다. 먼저 태양광발전시설의 기존 연구결과들을 중심으로 태양광 발전 효율에 영향을 미치는 변인을 정의하고 독립변수 및 종속변수를 설정한다. 그리고 본 연구에 적합한 가설을 설정하고 연구분석 모형을 제시하고자 한다. 연구의 대상 데이터는 모두 실측자료를 바탕으로 진행되었으며, IBM SPSS Statistics 12.0 을 활용하여 다중회귀분석을 진행하였고, 이를 통해 종속변수와 독립변수간의 관계와 영향도를 살펴보고자 하였다.

1.2. 선행연구검토

태양광발전시설의 발전성능에 대한 연구 쟁점은 대부분 발전량을 결정하는 요인을 탐색하고, 이러한 요인들이 각각 발전성능에 얼마나 영향을 미치는지 파악하고자 하는 것이다. 발전량을 결정하는 요인에는, 크게 기후적 요인과 지리적 요인, 설치조건적 요인(이하 환경적 요인)으로 나누어지며, 이들 각각의 세부항목들이 발전효율을 결정한다. 첫 번째로 발전량에 영향을 미치는 기후적 요인에 대한 연구는, 태양전지의 정의 자체가 태양광선의 빛 에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치를 의미하므로, '일사량이 발전량을 결정하게 되며, 따라서 '운량지수'가 높을 수록 발전량은 떨어지는 관계를 보임을 증명하고 있다(Park et al., 2012). 이외에도 '기온'이

30도 이상에서 높아질수록 PV 모듈의 표면온도가 상승하여 발전량이 떨어지는 관계를 보이고 있다(Shin et al., 2009). 두 번째로 발전량에 영향을 미치는 지리적 요인에 대한 연구는, 태양광 발전시설의 최적 입지를 탐색하는 논의와 맞닿아 있다. 일사량이 발전량에 영향을 미치는 제1요소이므로, 결국 일사량을 가장 많이 받을 수 있는 입지가 태양광시설의 발전효율을 극대화할 수 있는 지리적 요인이 되는 것이다. 이에 따라 태양의 계절별, 일별 고도각과 방위각을 토대로, 3차원 음영분석을 통해 최적의 입지를 선정하기도 하였으며(Kim & Um, 2015), 한반도 전체에 대해 연간 일조량을 분석하여 자원지도를 작성하는 등 연구가 활발히 진행되었다(Oh et al., 2012). 마지막으로 태양광 발전 설비가 상용화 되는 근래 다수의 연구는 환경적 요인을 대상으로 진행되고 있는 경향을 보이고 있다. 환경적 요인이라 함은 태양광 모듈의 설치 시 조절 가능한 환경적 변수로, 양각과 방위각, 음영, 혹은 음영에 영향을 주는 PV 모듈 간 이격거리 등을 일컫는다. 이처럼 설치여건과 밀접한 관계가 있는 환경적 요인에 대해서는, 크게 지역별로 최적 양각과 방위각을 도출한 연구(Park & Seo, 2012)와 양각과 방위각의 변화분에 따른 발전량 혹은 발전효율 변화 분을 도출한 연구(Choi et al., 2011)가 있다. 이격거리에 있어서도, 양각에 따른 태양전지 어레이의 간격을 도출한 연구(Choi et al., 2009)와 어레이 간격에 따른 최적 발전효율을 실험한 결과(Kim & Koo, 2011)가 있으며 수치지도 정보를 이용한 환경적 제약 요건을 최소화한 태양광 설치 방법을 제안한 연구(Jung & Kim, 2016)가 있다.

하지만 본 연구들은 대부분 일정한 실험 환경 하에 특정 인자의 영향 요인을 파악하기 위하여 다른 영향 인자를 통제된 상태로 연구 목적인 되는 요인의 영향 평가를 중심으로 하는 특징을 지니고 있다. 만약 상기의 연구가 모든 영향 요인이 동일한 환경 하에 있거나 통계적으로 유의한 샘플 수를 확보한 상태에서 진행되었다면 귀납적 접근에 의한 검증 결과를 수반할 수 있을 것으로 생각한다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구들의 한계점을 보완하기 위하여 태양광 발전 효율에 영향을 끼치는 요인을 개별 인자가 아닌 여러 인자들이 함께 영향을 끼친 결과물을 대상으로 하였으며, 실험 환경이 아닌 통상적인 환경 하의 발전량을 바탕으로 실증적인 분석을 진행하였다.

2. 연구의 대상 및 기초통계량

2.1 연구의 대상

본 연구를 위해서는 동일한 자연 환경의 영향을 받는 구역 내에 단지형 건물이 조성된 곳이 적합하다고 할 수 있으며, 따라서 초대형 대학캠퍼스가 적합한 대상 중의 한 곳이라고 판단하였다. 또한 대학을 대상으로 태양광 발전량의 사후 평

가가 이루어진 사례가 없으므로 서울 소재 S 대학을 연구의 대상으로 설정하였다. 서울특별시에 위치한 S대학교(37° 27' N, 126° 57'E)의 7개 건물을 대상으로 하였고, 본 대상 건물은 2016년 이전에 태양광발전시설 설치가 완료되고 현재까지 운영되고 있는 집합형 건물군이다. S대학교에서는 2003년부터 태양광 설치를 시작하였으며, 초기 외등용 설치 이후 대부분 보조전력용으로 설치된 상황이다. 2012년부터는 관련 법률에 의하여 도입 건물과 설치 용량이 꾸준히 증가하여 현재 11개 건물에 태양광 발전 시설이 도입되었으며, 전체 설치 용량은 891kW에 이르는 것으로 조사되었다. 본 연구의 분석 대상 건물 중 2016년의 데이터를 얻을 수 있었던 건물들은 본래 총 10개소였으나 데이터의 유실률이 높아 데이터의 통계적 신뢰성을 확보하기 어려운 1개소, 데이터의 증감률의 표준편차가 높은 2개소에 대해서는 연구의 대상에서 제외하였다.

2.2. 기초통계량

2.2.1 연구 대상의 일반 특성

연구에 사용된 7개 건물의 태양광발전시설들의 특성은 Table 1로 요약할 수 있다. 모든 대상 건물은 2016년 이전에 준공이 완료된 건물로 2016년 4계절 동안의 일간 발전량 데이터를 확보할 수 있는 사례이다. 데이터 샘플은 약 2,000여 개를 확보하였고, 효과적인 통계 분석을 위하여 월 단위 평균값의 데이터로 치환하였다. 일차적인 조사 결과 분석 대상 태양광 발전 설비의 총 설치용량은 538kW이고, 2016년 연간 발전량은 약 345,570kWh이다. 설치용량을 원단위로 한 발전 효율을 살펴보기 위하여 1kW당 발전량을 살펴보면, 설치용량 1kW당 최대 892kWh, 최소 487kWh, 평균 699kWh로 최대 약 1.5배의 발전원단위 차이를 보이고 있다.

Table 1. General information of target buildings' PV module

	8	15-1	38	62-1	86	86-1	101
Capacity(kW)	31	30	27	325	60	30	20
Power amount in 2016 (kWh)	21,578	23,724	24,086	191,082	49,657	18,365	17,079
Generation per kw PV area (m ²)	696	791	892	588	828	612	487
Tilt angle (°)	10	30	30	10	33	15	30
Azimuth	-20	-59	-25	0	+42	+72	+51
Rated Efficiency(%)	15.63	15.53	15.33	15.39	20.10	15.51	15.20

앙각의 경우 보통 북반구의 최적 앙각으로 알려진 30°내외가 주를 이루었으며, 방위각의 경우는 전체 평균이 약 -1.83°로, 이는 남남동 178.17°에 해당한다. 추가적으로 고려할 수 있는 변수인 설비용량의 단위는 kW이며, 모듈의 규격과 모듈개수를 곱하여 산출한다. 설치면적은 각 건물에 설치된 모듈의 면적을 모듈의 개수와 곱하여 산출하였으며 단위는 m²

이다. 앙각과 방위각의 단위는(°)이며, 방위각의 경우 남점을 기준으로 음수(-)는 동향, 양수(+)는 서향을 나타낸다. 모듈의 정격 효율은 변환 효율 산정 시 고려해야할 모듈자체의 사양이라고 할 수 있으며 한국에너지공단 자료의 자료를 통해 설치된 태양광 패널 모델명의 정격효율을 확인하여 사용하였다.

사례 대상은 태양광 패널의 일반적인 변환 효율인 15% 내외의 효율을 보이고 있다. 다만, 86동의 경우에는 가장 최신의 모듈을 도입한 사례로 변환효율이 20%에 이르고 있다. 따라서 변환효율 산정 시 기기 자체의 효율을 반영한 값을 변수 계산 시 진행하여 모듈 자체의 정격 효율 변수를 통제하였다.

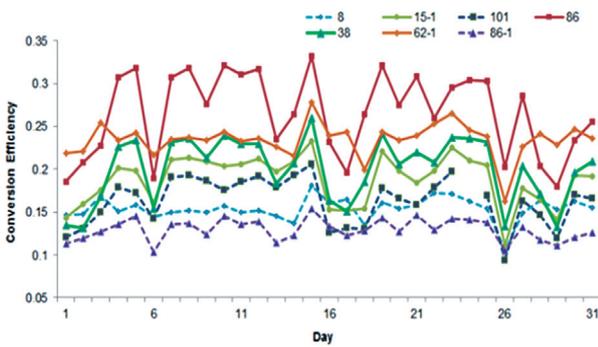
2.2.2 변환효율¹⁾

변환효율에 대한 기초통계량은 Fig. 1과 Table 2에 제시되어 있다. Table 2에서 나타나지 않은 통계량은 당해 월의 특정일 발전량 데이터가 모니터링 프로그램에 기록이 되지 않거나, 고장 등의 이유로 통상적인 발전량 데이터 변동 폭을 크게 벗어난 데이터들이 포함된 경우 관측 값에서 제외되었다. 이러한 값들은 일사량(X)과 발전량(Y) 사이의 회귀분석 결과 Y의 표준잔차의 절대값이 1이상인 경우이며, 이러한 값들은 산출된 회귀계수를 왜곡시키며, 종속변수의 설명력에 영향을 미치므로 제외하였다. Fig. 1과 같이 변환효율은 대체적으로 여름철에 낮게 나타나고 겨울철에 높게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 모듈 자체의 사양을 미반영한 상태에서 변환효율이 높은 순서는 86동, 62-1동, 38동, 15-1동, 101동, 8동, 86-1동의 순서를 보이고 있으며 분석 대상으로 사용한 샘플 수는 최종적으로 79개이며, 5개 데이터는 결측 처리하였다.

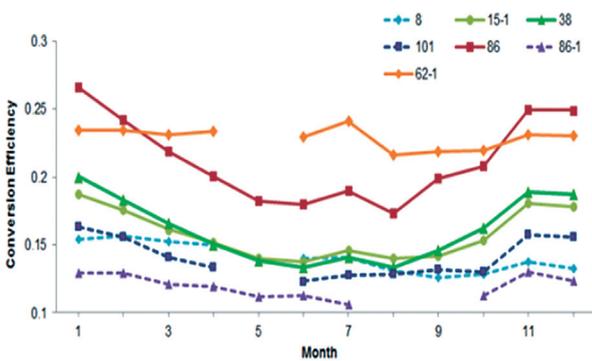
Table 2. Conversion efficiency monthly average of target building

	8	15-1	38	62-1	86	86-1	101
Jan	0.15385	0.18752	0.20003	0.23431	0.26563	0.25909	0.16292
Feb	0.15627	0.17601	0.18337	0.23412	0.24215	0.25890	0.15584
Mar	0.15265	0.16115	0.16606	0.23119	0.21892	0.24249	0.14088
Apr	0.14962	0.15175	0.15041	0.23335	0.20033	0.23841	0.13310
May	-	0.14009	0.13822	-	0.18209	0.22363	-
Jun	0.14030	0.13757	0.13368	0.22926	0.17984	0.22631	0.12313
Jul	0.14073	0.14608	0.14055	0.24130	0.18943	0.21191	0.12799
Aug	0.13102	0.13991	0.13317	0.21617	0.17276	-	0.12855
Sep	0.12611	0.14210	0.14611	0.21857	0.19874	-	0.13151
Oct	0.1284	0.15318	0.16247	0.21978	0.20802	0.22639	0.13043
Nov	0.13736	0.18020	0.18847	0.23105	0.24949	0.25999	0.15713
Dec	0.13227	0.17773	0.18737	0.23049	0.24880	0.23907	0.15607
Average	0.14078	0.15777	0.16083	0.22905	0.21302	0.23862	0.14069
standard deviation	0.01085	0.01811	0.02391	0.00770	0.03145	0.01680	0.01447

1) 변환효율의 산정식은 3.2.1 장의 변수설명을 통해 제시되었으며, 본 장의 변환효율 값 역시 본 식을 통해 산정하였다.



a) Daily Fluctuation on January (2016)



b) Monthly Fluctuation (2016)

Fig. 1. Conversion efficiency of target building

3. 가설 및 연구방법

3.1 연구 가설 및 분석 모형

본 연구는 태양광 패널의 설치 이후 운영 관리 과정에서 발생한 실제 발전 실적 데이터를 기반으로 설치여건과 관련 높은 환경적 요인이 태양광발전시설의 변환효율에 어떠한 영향을 미치는지 분석하는 것을 주요 목적으로 한다. 변환효율은 하나의 발전시설에 해당하는 모든 태양광모듈의 면적에 투입되는 빛에너지, 즉 일사량 대비 산출하는 발전량 값으로 한정하였다. 태양광모듈은 빛에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 기능하므로, 이에 태양광 모듈의 성능을 평가하기 위해서는 단위 면적당 빛에너지를 얼마만큼의 전기에너지로 변환할 수 있는지를 파악함이 자명하기 때문이다. 시중에 생산되는 태양광모듈의 변환효율은 대개 16~20% 정도로, 이는 표준 시험조건(Standard Test Condition: STC)하에 측정된 값을 나타낸다. 표준 시험 조건은 방사조도(일사량) 1,000W/m², 25°C의 모듈 표면온도, AM 1.5의 분광분포²⁾로 구성되어 있

2) AM은 Air Mass의 약어로, 태양광선이 실제 도달하는 경로를 태양광선의 직상부 경로에 대해 표시한 비율이다(Park et al., 2013).

다. 따라서 이러한 조건을 충족하지 않을 시, 변환효율은 더 낮아지거나 혹은 더 높아질 수 있다. 이외에도 각기 다른 설비용량을 보이는 발전시설들을 비교분석하기 위해서는 절대 수치인 발전량 대신 상대적 수치인 변환효율을 사용하는 것이 타당하다. 이에 종속변수를 변환효율로 한정시켜 분석을 진행하였다. 연구의 가설은 ‘양각, 방위각, 음영은 태양광 모듈의 변환 효율에 각각 일정한 영향을 미칠 것이다.’이며, 이와 같은 가설을 검증하기 위하여 다음과 같은 회귀모형을 설정하고, 이를 토대로 다중회귀분석을 진행하고자 한다.

$$E_i = \quad (1)$$

$$\alpha + \beta_1 ANG_i + \beta_2 AZIM_i + \beta_3 SHADE_i + \sum_{k=1}^n f_k X_i + \epsilon_i$$

종속변수 E_i 는 발전시설 i 의 변환효율을 나타내는 변수이다. 본 연구에서는 변환효율 지표로 0에서 1사이의 값을 갖는 지표로 변환하였다. 독립변수 ANG_i 는 발전시설 i 의 설치각도, 즉 양각을 나타내고, $AZIM_i$ 는 발전시설 i 의 방위각을 나타내며, $SHADE_i$ 는 모듈에 발생하는 음영비율을 나타낸다. 마지막으로 X_i 는 발전시설 i 의 지리적, 기후적, 기타 설비적 변수를 통제하기 위한 통제변수들이 포함된 n 차원 벡터로, 발전시설 i 의 지리적 위치, 기후상황, 설치년도, 제조사, 관리주기 등이 포함되어 있다고 할 수 있다.

3.2. 자료 및 변수 정의

본 연구에서는 태양광 발전시설이 설치된 각 건물의 2016년 일 단위 태양광 발전량 자료를 사용하여 분석을 진행하였다. 각 건물의 태양광 발전량 자료는 각 건물 등에 설치된 모니터링 프로그램을 통해 저장되고 있으며, 시간 단위 이하로 발전량과 전압, 전류 등이 측정되고 있다. 태양광 발전량 자료에 포함되지는 않았지만 분석에 추가적으로 필요한 일사량 자료들은 기상청의 과거 국내기후자료에서 제공하는 2016년 일 단위 일사량 지표를 사용하였다. 또한 모듈 면적, 양각과 방위각, 이격거리에 대해서는 현장 관리자의 도움을 받아 현장조사를 통해 측정하거나 현장 도면을 이용하여 분석하였다.

3.2.1 종속변수: 변환효율

종속변수로 사용되는 변환효율은 각 건물의 태양광 발전량 자료와 기상청에서 제공하는 일사량 자료, 각 건물에 설치된 태양광 모듈의 전체 면적을 이용하여 구축하였다. 이 때 기상청에서 제공하는 일사량 수치는 MJ단위로, 단위를 Wh로 통일하기 위하여 MJ단위 일사량 수치에 277.78의 변환상수를 곱해주었다. 변환효율 η_{pv} 의 계산은 다음과 같다(Cha, 2015).

$$\eta_{pv} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2)$$

여기서, P_{OUT} [Wh]는 태양광 발전시설의 발전량, [Wh]는 태양광 모듈 전체 면적에 입사하는 빛에너지(즉, 일사량)이다. 따라서 P_{IN} 은 다음과 같이 구성된다.

$$P_{IN} = A \times R \quad (3)$$

여기서, $A[m^2]$ 은 발전시설에 해당하는 태양광모듈의 총 면적, R 은 태양광모듈에 에 입사하는 일사량[wh/m²]이다. 본 연구에서는 기본적으로 변환효율을 발전시설의 성능을 평가하는 주요 지표로 사용하되, 설치용량 대비 발전량, 면적 대비 발전량을 보다 세부적인 분석을 위하여 추가적으로 사용하고자 한다.

3.2.2 독립변수 : 효율에 영향을 주는 설치 조건

본 연구에서는 변환효율에 대한 전체적인 영향 요인을 검토하기 위하여 설치년도, 설치용량, 모듈의 정격효율 등 변환 효율에 영향을 줄 것이라고 예상되는 추가적인 변수를 포함한 통계 검정을 별도로 진행하여 두 개의 모형이 나타내는 변환 효율에 대한 설명력 지수를 비교하였다.

먼저 양각의 경우, 실측한 양각 자료들은 비슷한 수준으로 묶어 0°, 15°, 30°로 구분하였다. 양각은 실제 현장조사를 통한 측정과 시공 도면의 확인을 통해 정보를 수집하였다. 방위각의 경우에는 측정한 북점기준 방위각 정보를 토대로 구축하였고 양각과 마찬가지로 시공도면을 통한 확인 작업을 진행하였다. 북점기준 방위각을 남점기준으로 통일하였고, 남점에서 벗어나는 정도를 절대값으로 치환하여 변수 값으로 설정하였다. 이처럼 절대값으로 처리한 것은 연속형 변수로 처리하기 위함이다. 방위각의 경우 절대 값 수치를 기반으로 크게 30 또는 60으로 구분하고 있으며 세부적인 방위각을 변수 값으로 사용하였다. 마지막으로 음영 비율은 전체 PV 면적 대비 음영이 드리워지는 면적의 비율을 일단위로 산정하여 월평균 값을 통계 데이터로 활용하였다. 'Sketch-Up' 등의 프로그램을 활용하여 음영 비율을 산정하는 여러 시뮬레이션 방법이 있지만 설치 현장과 주변 지장물의 여건을 가장 정확하게 반영할 수 있도록 'Suneye 210'³⁾라는 측정도구를 이용하여 현장에서 직접 태양광 패널에 드리우는 연중 음영비율을 측정하였다. 이때, 월 평균 음영 비율은 해당 포인트의 음영 비율이기 때문에 전체 평균 면적 대비 음영 비율을 대표하지 못하므로 서울시에서 제공하는 3D 입체지도의 일조권 분석 기능을 보완하여 전체 음영 비율을 산정하였다. Fig. 2와 같이 101동의 경우 오전 중에는 Case 1과 같이 PV패널 하단에 음영이 드리워졌고 오후에는 Case 2와 같이 남향 기준 왼쪽 대각선 방향에서부터 음영이 드리워졌다. 따라서 각 시간대 패널에 발생한 음영의 교차점을 기준으로 구획을 나누어 각 구획점에서의 음영비율을 측정하였고, 각 구획별 음영면적을 가중 평균하여 전체 패널의 음영비율을 도출하였다.



a) 2016. 12. 21. 9:00 AM - Case 1



b) 2016. 12. 21. 16:45 PM - Case 2



c) [Suneye 210 measurement point] - Case 3

Fig. 2. Example of Calculation on Shadow Area Percentage: Building No.101

Table 3. Average of monthly shaded area and conversion efficiency

Building No.	Average of Shade area (%)	Average of conversion efficiency (%)
8	5.290909	0.140784
15-1	4.333333	0.157779
38	3.416667	0.160831
62-1	0.272727	0.229057
86	0.409091	0.208237
86-1	0	0.238624
101	5.141667	0.143779

3) 미국 Solmetric 社の 휴대용 어안렌즈 카메라로, 모듈에 드리우는 음영 비율을 측정하는 기기이다. 특정 지점의 음영패턴을 보여주며, 일, 월, 연별로 모듈에 도달가능한 일사량을 계산한다.

3.2.3. 통제 변수

본 연구에서는 변환 효율에 영향을 끼칠 수 있지만 실제 연구 대상이 되지 않은 영향 변수들에 대해서는 연구 대상에서 제외하는 방식의 변수 통제를 진행하였다. 즉, 연구의 대상을 기후적 영향이 일정한 범위로 한정함으로써 설치고도, 위치, 기온, 운량 등의 변수를 통제하였다. 나아가 변환효율에 영향을 줄 수 있는 모듈 효율 등의 제원적 변수는 변수의 표준화 과정을 통해 변환 효율에 반영하였지만 실제로 그 영향은 미미한 수준으로 통계 모형 구축시 위한 참고자료로 활용하였다.

4. 통계 검정결과

4.1. 통계처리용 자료의 특성, 신뢰성 및 타당성

방위각, 경사각, 음영 변수에 대한 신뢰도 검정 결과 Cronbach의 알파 값이 0.6 이상으로 신뢰도에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 정규분포를 확인할 수 있는 P-P 도표의 플롯을 통해 정규성에 대한 이상치도 발견할 수 없어 본 자료는 신뢰성을 가지는 자료라고 판단할 수 있다.

Table 4. Reliability Statistics

α of Cronbach	α of Cronbach based on standardized item	N of item
.644	.710	3

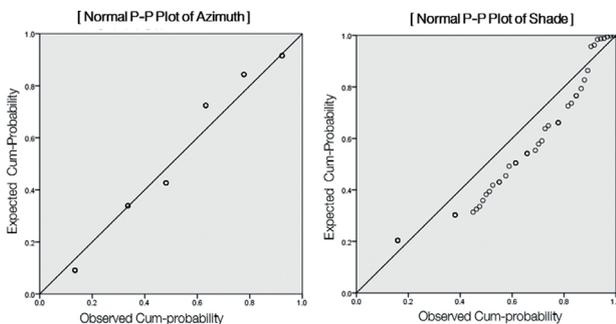


Fig. 3. Distribution of the independent variables

4.2. 변수간 상관성 분석 결과

변수간의 상관성을 분석한 결과 종속변수인 변환효율은 방위각, 음영, 양각의 순으로 상관성이 높았으며 모두 부의 관계를 지니고 있다. 즉, 방위각이 정남으로부터 벗어난 수준이 클수록, 음영 면적이 넓을수록, 양각이 클수록 변환효율이 낮아지고 있는데 세 변수 모두 유의한 상관성을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 독립변수간 상관성은 양각과 방위각의 상관성이 가장 높은 것으로 측정되었으며 강한 정의관계를 보이고 있다. 상관성의 수준은 모두 신뢰수준 99% 수준에서 유의하였다.

Table 5. Correlation between variables

		Tilted Angle	Shade	Azimuth	Conversion Efficiency
Tilted Angle	Pearson Correlation coefficient	1			
	Significance level (both)				
Shade	Pearson Correlation coefficient	.147	1		
	Significance level (both)	.195			
Azimuth	Pearson Correlation coefficient	.840**	.360**	1	
	Significance level (both)	.000	.001		
Conversion Efficiency	Pearson Correlation coefficient	-.317**	-.509**	-.550**	1
	Significance level (both)	.004	.000	.000	
N		79	79	79	79

** Correlation is significant at the 0.01 a-level. (both)

4.3. 종속변수에 대한 영향도 분석 결과

독립변수인 양각, 음영, 방위각과 변환효율간의 인과관계 분석을 위하여 다중회귀분석을 실시한 결과 음영, 방위각, 양각 모두 신뢰도 95% 내에서 유의성 있는 변수로 채택되었다. 모형의 설명력을 나타내는 R²값은 0.443을 나타냈다. 참고로 설치 환경적 요인 이외의 설비 제원적 요인인 모듈효율, 설치 용량, 설치 년도 등의 변수들을 포함하였을 경우의 변환효율 값의 설명력은 0.822를 나타냈으며 따라서 환경적 요인 외의 요인들이 모두 포함된 모형은 태양광 변환 효율을 대부분 설명할 수 있는 높은 설명력을 지니고 있음을 확인하였다.

다중회귀분석 결과 설치 환경과 관련된 환경적 요인 변수들인 음영, 방위각, 양각은 모두 유의성 있는 변인으로 모형에 포함되었으며 표준화 계수 베타 값을 통해 각각의 변수들 중 방위각이 가장 큰 영향도를 보이고 있으며 다음으로 양각⁴⁾ 과 음

4) 양각의 경우에는 상관분석 상에서는 부의 관계를 가지지만 회귀분석 결과에서는 정의관계를 보이는데, 이는 상관분석이 비통제 이변량 관계이고 회귀분석은 통제된 상태의 이변량 관계이기 때문이다. 변수간의 편상관계 분석표를 참고하면 아래와 같은데 양각과 변환효율은 양의 상관관계로 회귀계수와 동일한 부호를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Variable	Partial Corr.	Semipartial Corr.	Partial Corr. ²	Semipartial Corr. ²	Significance Value
shade	-0.3337	-0.2642	0.1113	0.0698	0.0030
azimuth	-0.4272	-0.3526	0.1825	0.1244	0.0001
yanggak	0.2254	0.1727	0.0508	0.0298	0.0487

영 순으로 나타났지만 두 변수간의 영향도 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 결과적으로 방위각이 음영 및 양각보다 약 2배 정도 변환효율에 영향을 주고 있으며 정남향을 기준으로 동서 방향으로 어느 정도 회전이 되어 있는가가 변환효율에 가장 큰 부의 영향을 주는 것으로 나타났다.

Table 6. Factors Affecting Conversion Efficiency of Photovoltaic Power Generation

Model	Nonstandard coefficient		Standard coefficient	t	
	B	Standard error	β		
					(Constant)
1	Shade	-.004**	.001	-.297	-3.065
	Azimuth	-.001***	.000	-.723	-4.092
	Tilted Angle	.001*	.001	.334	2.004

a. Dependent variable: Conversion Efficiency
* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

[Model Summary]

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Standard error of estimate
1	.665a	.443	.421	.032823

a. predictor: (constant), Tilted Angle, Shade, Azimuth

[Dispersion analysis table]

Model	Sum of squares	df	Mean square	F	Significance level	
1	regression analysis	.064	3	.021	19.874	.000b
	residual	.081	75	.001		
	total	.145	78			

a. dependent variable: Conversion Efficiency
b. predictor: (constant), Tilted Angle, Shade, Azimuth

Table 7에서와 같이 독립변수들을 단계적으로 진입한 방식의 회귀모형에서도 각각의 변수로 구성되는 3개의 모형이 모두 유의성 있는 모형으로 설정된 것을 확인할 수 있다.

Table 7. Model through step-by-step entry of independent variables

Model		Nonstandard coefficient		Standard coefficient	t
		B	Standard error	β	
1	Azimuth	-.001***	.000	-.550	-5.774
	(Constant)	.219	.006		33.901
2	Azimuth	-.001***	.000	-.421	-4.471
	Shade	-.005***	.001	-.357	-3.789
3	(Constant)	.204	.010		20.682
	Azimuth	-.001***	.000	-.723	-4.092
	Shade	-.004**	.001	-.297	-3.065
	Tilted Angle	.001*	.001	.334	2.004

a. dependent variable: Conversion Efficiency
* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

5. 연구의 결론 및 시사점

본 연구는 태양광 발전 설비의 도입이 급속히 증가하고 있는 여건에서 설치 후 운영 과정상의 발전량 평가를 통하여 환경적 요인이 변환 효율에 영향을 주는 정도를 실증적으로 확인하여 향후 태양광 발전 설비 도입과 운영 시 감안해야 할 물리적 설치 여건의 주안점을 확인하고자 하는 목적을 지니고 있다.

사례 분석 결과 일정한 지역 내에 태양광 설비가 설치되어 있더라도 최대 1.5배 이상의 단위 용량 당 발전량 차이를 나타내고 있음을 확인하였고, 이의 원인을 파악하기 위하여 변환 효율에 요인을 주는 설치 환경적 요소들의 통계적 유의성을 검정하였다. 통계 검정 결과 본 연구의 가설로 설정했던 방위각, 양각, 음영 모두 변환 효율에 영향을 주는 유의성 있는 변인인 것을 확인하였다. 통상적으로 중요하게 다루어지는 방위각 이외에도 음영과 양각이 실제 환경에서도 변환효율에 영향을 끼치는 영향인자임을 확인하였으며 따라서 설치 환경에 대한 사전 검토를 통해 변환 효율 제고를 위한 노력이 필요함을 확인할 수 있다. 예를 들어 방위각의 경우에는 일반적으로 건물의 향을 따라가거나 수직인 방향을 채택할 가능

성이 농후하기 때문에 특정 지역에 대한 방위각 대비 적절한 양각을 미리 설정하여 도입 시 준수하도록 하는 것이 필요하다. 실제로 서울시에서 제공하는 햇빛지도를 토대로 작성한 Fig. 4에 의하면 본 연구 대상인 S대학의 경우에는 남향일 경우 패널의 경사각이 30도 일 경우 가장 발전 효율이 높으며, 남동일 경우에는 15도 인 것을 확인할 수 있다.

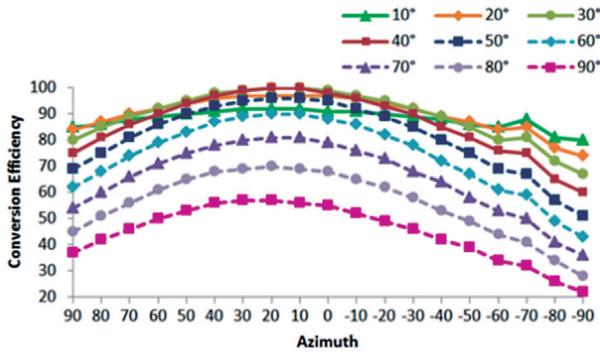


Fig. 4. Simulation of power generation efficiency by azimuth and installation angle of solar panel

음영의 경우에는 옥상에 설치되는 코어와 난간, 그리고 냉난방 실외기와 같은 각종 설비 장비와의 종합적인 배치 계획을 통해 음영 간섭을 최소화 하는 영역 설정이 필요하다. 신재생 에너지 의무 도입 비율이 상향 조정된 근래에는 옥상 면적 부족에 의한 음영 간섭이 커지고 있는 현실에서 옥상 공간의 활용에 대한 전체적인 계획이 선행되어야 함을 시사하고 있다.

본 연구는 발전 효율에 영향을 끼치는 다른 변수를 통제하고 하나의 영향 인자별로 최적화 방안을 연구했던 기존 연구에 비하여 실제 현장에서 운영된 발전량 정보를 바탕으로 복수의 변수를 대상으로 한 다중회귀분석을 진행한 연구이다. 따라서 주요한 3가지 영향변수 간의 상대적 영향도 파악이 가능하였는데, 영향 요인 설명 모형의 표준 계수 값이 방위각, 양각, 음영 순으로 나타났으며, 상대적 영향도는 방위각이 다른 변수들에 비하여 약 2배로 나타나는 것으로 보아 발전 효율 측면에서는 무엇보다 방위각에 대한 고려가 중요한 것으로 나타났다.

본 연구에는 실증 연구를 위해 실제 사이트에서 데이터를 수집하였음에도 불구하고 현지 모니터링의 유지 관리에 문제가 있는 사유로 일부 데이터를 결측 처리하거나 보정한 한계를 가지고 있다. 이 같은 현상에 대한 원인을 확인하기 위하

여 관리자 심층 인터뷰를 진행한 결과 발전량 모니터링의 실시간 통합감시체계⁵⁾ 부재, 인버터 등의 고장에 대한 설치 업체의 기술 지원 지연 등이 주요한 원인인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구와 같은 사후 평가가 사이트 단위로 지속적으로 수행되어 급속히 증가하고 있는 태양광 발전의 도입과 향후 유지 관리 개선에 도움을 줄 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20169210100270).

References

Cha, W. C. (2015). "A Study on the Prediction of the Annual Power Generation through the Analysis on Factors Affecting Photovoltaic Power Generation" *Department of Electrical Engineering, Graduate School of Soongsil University*, pp. 22–23.

Choi, H. K., Choi, D. W., Yoo, H. C., Choi, S. G., and Kim, Y. K. (2009). "A Study on the Photovoltaic Array Optimal Arrangement Considering Power Output" *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 23(12), pp. 96–105.

Choi, Y. K., Kim, Y. K., Kim, H. G., and Shin, M. C. (2011). "A Study on Changes to the Azimuth Angle and Tilt of a Photovoltaic Array and its Influence on Solar Radiation" *Proceedings of KIIEE Annual Conference, The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers*, pp. 337–338.

Jung, J. H., and Kim, B. I. (2016). "Using Numerical Maps to Select Solar Panel Installation Sites no Expressway Slopes" *Korean Journal of Construction Engineering and Management, KICEM*, 17(5), pp. 71–77.

Kim, J. N., and Um, D. Y. (2015). "Solar Power location analysis for improving the efficiency of solar photovoltaic" *Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, pp. 303–305.

Kim, S. J., and Koo, K. J. (2011). "A Study on Optimizing of Roof-Top Photovoltaic Arrays Arrangement Based on Three-Dimensional Geo-Spatial Information" *Korean Journal of Construction Engineering and Management, KICEM*, 12(6), pp.

5) 시간을 두고 순차적으로 진행되는 신축에 의하여 태양광 발전 설치 업체가 모두 달라 시스템 통합이 어렵고, 이를 위한 별도의 모니터링을 위한 투자가 이루어지고 있지 않기 때문이다.

151-159.

Korea Energy Agency (2016). "New & Renewable Energy Statistics 2015" pp. 3-149.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2014). "The Fourth New & Renewable Energy Master Plan" pp. 1-20.

Oh, S. K., Ihm, P. C., and Lee, K. H. (2012). "Optimal Electric Generation for Fixed-Type Photovoltaic System Installed for Residential Building in Korea" *GRI REVIEW*, Gyeonggi Research Institute, 14(2), pp. 271-288.

Park, K. H., Lee, J. H., Kim, S. M., and Park, K. W. (2012). "Analysis of the Correlation between Climate Elements and Electricity Generation of Building Intergrated Photovoltaic on Gymnasium Building's Curtain Wall" *Journal of the Korean Solar Energy Society*, The Korean Solar Energy Society, 32(1), pp. 8-14.

Park, S. H., and Seo, J. H. (2012). "A Study on the Photovoltaic Module Layout Considering the Azimuth and Inclination in Region" *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 24(6), pp. 461-466.

Shin, H. Y., Choi, H. K., Kim, Y. K., An, Y. K., Choi, J. Y., Yoon, C. G., Lim, M. H., Kim, J. S., and Seo, B. G. (2009). "The efficiency of solarcell related to temperature" *Proceedings of KIIEE Annual Conference*, The Korean Institute of Illuminating and electrical Installaion Engineers, pp. 356-359.

Yang, S. M. (2014). "Issue Analysis and Improvement Schemes in Executing New Renewable Energy Installation Institution for Public Buildings"

Department of Construction Engineering, The Graduate School of Chung-ang University, pp. 66-70.

요약 : 본 연구에서는 단지형 건물군 내 여러 건물의 옥상에 설치된 태양광 패널의 연간 발전량 분석을 통해 설치 여건에 따른 발전 효율의 차이와 원인을 확인하고자 하였다. 즉, 일정한 지역에 입지한 다수의 태양광 발전 실적에 대한 사후 평가를 통하여 효율에 영향을 끼는 환경적 변수를 도출하고 이들의 상대적인 영향력을 파악하고자 하였다. 기존의 연구는 개별적 영향 요인의 최적화 방안을 실험 환경에서 도출한 연구가 주를 이루고 있으며 실제 운영 성과물을 대상으로 한 실증적인 연구가 부족한 실정이다. 본 연구의 결과, 같은 지역에 설치되어 있더라도 환경적 요인에 의하여 최대 1.5배의 발전 효율을 보이고 있음을 확인하였다. 또한 변환 효율에 영향을 주는 변수인 방위각, 양각, 음영에 대해서 통계적 검정을 실시한 결과 모든 요인이 종속변수인 변환효율에 영향을 주는 변수임을 통계적으로 확인하였다. 가장 큰 영향을 주는 요인은 방위각이며, 다음으로 양각과 음영이 발전효율에 영향을 끼치는 요인으로 밝혀졌다. 본 연구를 통해 태양광 발전 설비의 도입이 꾸준히 증가하고 있는 여건에서 실제 설치된 환경적 요인이 변환 효율에 영향을 주는 정도를 실증적으로 확인하여 향후 도입되는 태양광 발전 설비의 설치 가이드라인을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : 태양광 설비, 태양광 발전, 사후 평가, 변환 효율, 발전 효율
