



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

자가소비형 태양광발전 시스템의
운영 효과 분석

濟州大學校 産業大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學科

李宰一

2023 年 2 月

자가소비형 태양광발전 시스템의 운영 효과 분석

指導教授 李 開 明

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2022 年 12 月

李宰一의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

진영규



委 員

김시호



委 員

이개명



濟州大學校 産業大學院

2022 年 12 月



Analysis of the Operation Results of Self-Consumption Photovoltaic Systems

Jae-II Lee

(Supervised by Professor Gae-Myoung Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2023. 2.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 선행 연구의 고찰	3
1.3 연구 내용	5
2. 태양광발전 시스템의 개요	6
2.1 태양광발전의 개념	6
2.2 태양광발전의 활용	7
3. 태양광발전 시스템 운영 결과 분석 방법	9
3.1 설비이용률과 피크시간대 태양광발전 이용률	9
3.2 온실가스배출 감축 효과 분석 방법	10
3.3 태양광발전의 수익 창출 구조	11
3.4 자가소비형 태양광발전 시스템 발전 수익	16
3.5 자가소비형 태양광발전 시스템 운영 결과 분석 절차	18
4. 사례 연구	20
4.1 태양광발전 시스템 구성과 제원 및 설치 환경	20
4.2 경제적 측면 분석	28
4.3 설비 성능 측면 분석	36
4.4 환경 측면 분석	41
4.5 결과 고찰	43

5. 결 론 45

참 고 문 헌 46

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Configuration of photovoltaic systems	6
Fig. 2 Basic structure and operating principles of solar cells	7
Fig. 3 The applications of photovoltaic	8
Fig. 4 SMP pricing process	12
Fig. 5 Weighted average SMP of Main-land and Jeju by month in 2021	12
Fig. 6 Procedure of analysis method of self-consumption PV system	19
Fig. 7 PV systems on the roofs of three buildings in the Jeju Science Park	20
Fig. 8 Location of the Jeju Science Park	21
Fig. 9 Location of the three PV systems	21
Fig. 10 Configuration of the Smart Building 75kW PV system	22
Fig. 11 Comparison of the average amount of solar radiation of the Elite Building with the hours of daylight at the 184 Standard Weather Observatory	26
Fig. 12 Solar panel tilt angle of each PV system	27
Fig. 13 Solar panel azimuth angle of each PV system	28
Fig. 14 Comparison of season & time-of-use energy rates during a day before and after rate revision	29
Fig. 15 Total energy generation by the PV systems in 2021	29
Fig. 16 Comparison of energy generation amounts in each time-of-use period according to the rules before and after the revision	30
Fig. 17 Comparison of savings amounts of energy cost in the 3 time-of-use periods before and after the revision	30
Fig. 18 Comparison of total electric energy cost savings before and after the revision	31

Fig. 19 Ratio of generation amount to consumed electric energy and ratio of saving amount to electric energy cost in each building in 2021	32
Fig. 20 Consumed electric energy amount and fee in each time-of-use period in 2021 and 2022	33
Fig. 21 Comparison of consumed electric energies amount and fees in 2021 and 202 year	34
Fig. 22 Annual generation amount trend after generation started	35
Fig. 23 Cumulative generation revenue and payback period of each PV system	36
Fig. 24 Monthly capacity factor & hours of daylight	37
Fig. 25 Comparison of monthly capacity factor and average slope solar radiation in 2021	38
Fig. 26 Comparison of monthly capacity factor and average horizontal solar radiation in 2021	38
Fig. 27 Elite Building rooftop 45kW PV System	39
Fig. 28 Monthly maximum power demand of each building	40
Fig. 29 Effect of reducing greenhouse gas emissions and planting of pine trees per 10kW of facility capacity	42

LIST OF TABLES

Table 1 REC weight by renewable energy source	13
Table 2 Electricity tariff classification by contract type	14
Table 3 Classification of electricity rates by season and time of use	15
Table 4 Application of differential electric energy tariff	15
Table 5 Season and time-of-use change in Jeju area('21.9.1 enforcement)	15
Table 6 Change time-of-use classification table in Jeju area	16
Table 7 Energy charge by season, time-of-use and contract type	17
Table 8 Summary on the buildings and specifications of the PV systems	22
Table 9 Specifications of the solar cell module	23
Table 10 Specification of the inverters	24
Table 11 Meteorological data by year at Jeju automated synoptic observing system	25
Table 12 Meteorological data by year at Sanchendan automatic weather station	25
Table 13 2021 Monthly meteorological data at Jeju automated synoptic observing system	26
Table 14 Change rate of electric charge amount of 2022 to 2021 year	33
Table 15 Cumulative generation amount and generation revenue after generation started	35
Table 16 Annual capacity factor	37
Table 17 Peak time zone for each building	40
Table 18 Capacity factor during peak time zone of each building	41
Table 19 CO ₂ reduction by year	42
Table 20 CO ₂ reduction effect of generation amount of by year	43

SUMMARY

Responding to the climate crisis requires changes in energy supply infrastructure around the world, and the introduction of a new greenhouse gas reduction system is an essential element of this global trend. Conversely, in Jeju, where the penetration ratio of renewable energy generation is the highest in the South Korea, a paradoxical phenomenon is occurring that the curtailment of generated renewable electric energy is increasing. The revitalization of various development projects and tourism industries in Jeju is increasing the number of large buildings.

In this thesis, as the aspect of a consumer self-using electric energy generated and not selling it, a procedure analyzing the operation data of self-consumption photovoltaic(PV) systems was proposed and some analyzed results of a few PV systems presented. The 4 rooftop PV systems in the Jeju Science Park were chosen as study objects. 2021 year annual electric energy generated by the 4 PV systems of the 3 building rooftop PV systems was 352,356 kWh, and the saving amount of electricity bill was 40,289,767 won. The time-of-use electricity fee system is chosen in Korea and the rule in only Jeju Island was revised from Sep. 1 2021 due to special consumption pattern of electric energy in Jeju. The effect of rule change in Jeju on economy of self-consumption PV system was analyzed, and it was proved to take disadvantage on the economy. The annual capacity factor was about 9.8% of the Elite building's rooftop photovoltaic system, which is the most aging and has a horizontal inclination angle, while the rest of the buildings had an annual average capacity factor of 14%. Although peak time of electric energy consumption varies depending on the purpose of use of the building, it is expected, through the results of the high capacity factor of the PV systems during the peak time, that there will be some room for lowering the peak demand of electric energy consumption. The reduced greenhouse gas emissions over a year was about 161.9 $tonCO_2eq$.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

전 세계적으로 지구온난화로 인한 폭염, 폭설, 산불 등 이상기후 현상이 근래에 더 심해지고 있다. 세계기상기구 (WMO : World Meteorological Organization)에 따르면 지난 50년 동안 기후 및 기상 관련 재해가 400% 급증했다고 한다. 세계 여러 지역에서 기상, 기후 및 강수량의 극단적인 현상이 증가하고 있으며 앞으로 더 빈번하고 심각해질 것이라고 세계기상기구는 예상하고 있다[1]. 우리나라도 예외는 아니다. 기상청 발표자료 ‘기후변화가 바꾼 우리나라 사계절과 24절기’에 따르면 최근 30년(1991~2020년)은 과거 30년(1912~1940년)에 비해 연평균 기온이 1.6℃ 상승하였고, 10년마다 0.2℃씩 꾸준히 상승하였다. 연 강수량은 증가하였으나 강수일수는 감소하여 강수강도가 강해지는 추세이며, 2022년 8월 중부권의 기록적인 집중호우 역시 이런 기후변화의 영향이라고 생각할 수밖에 없다[2]. 제주지역에서도 이런 기후변화의 특성을 볼 수 있다. 제주지방기상청의 ‘제주도 기후변화 특성 분석집’에 따르면 분석 기간 1961~2018년 동안의 연평균 기온은 0.29℃/10년씩 상승하였음을 보여주며, 장기적인 기온상승 경향이 모든 계절에서 뚜렷함을 보여주고 있다. 지구온난화에 따라, 고온 극한 현상일수는 증가하였고 저온 극한 현상일수는 감소하였으며, 연 강수량은 49.46mm/10년으로 증가하고 강수강도가 0.49mm/일로 증가 경향이 분석되었다. 이런 분석은 기록적인 폭우 현상의 경향을 보여준다고 할 수 있다[3]. ‘신기후체제 대비 제주특별자치도 기후변화 전망보고서’에서 기후변화에 관한 국가 간 협의체 (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 5차 평가보고서용으로 생산한 온실가스배출 시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 적용한 제주지역의 기후변화 전망에 대한 분석 결과를 보면 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 RCP 6.0 시나리오의 경우에도 연평균기온, 강수량은 증가하며, 생육도일, 유효적산온도, 열지수, 불쾌지수, 냉방도일은 증가하고, 난방도일은 감소하는 등의 온난화 추세를 보여주고 있다[4]. 이러한 상황으로 인해 전 세계

적으로 화석연료 사용에 따라 발생하는 다양한 문제를 해결하기 위해 다방면으로 대책 검토가 이루어지고 있으며, 그중 온실가스배출 감축을 위해 깨끗한 에너지로의 전환이 확산하고 있다.

우리나라는 유엔기후변화협약사무국에 2030년 국가 온실가스 감축목표와 2050년 장기 저탄소 발전전략을 2020년 12월 30일에 제출하였다. 이 자료에 따르면 2030년 국가 온실가스 감축목표로 2017년 배출량 대비 24.4% 감축을 제시한 바 있다[5]. 그 후 국제적인 감축목표 상향에 대한 압력과 경향에 따라 2021년에 우리나라는 2030년까지 2018년 기준 40% 감축으로 상향된 목표를 제시하였다. 건물 부문에 있어서는 제로 에너지 건축과 그린리모델링의 확대 기초하에 에너지 효율 향상, 고효율 기기 보급, 수요관리, 스마트에너지 관리, 청정에너지 보급 확대로 2018년 대비 32.8% 감축을 목표로 하고 있다[6].

한편, 제주에서는 신재생에너지 발전시설, 특히 태양광발전 시설의 설치가 확대됨에 따라 전력계통의 안정성을 위해 신재생에너지 발전시설에 대한 출력제한이 증가하는 추세이다. 이런 상황 속에서 2022년 2월 탈핵·기후 위기 제주 행동은 “에너지 다소비 건물 업체명 공개 기자회견”을 통해 2020년 기준 제주지역 에너지 다소비 건물 현황에 대한 자료를 발표했다[7]. 최근 10년 제주지역의 건축물은 대형화 및 고층화 경향이 두드러지고 있으며, 이로 인해 건물 부문의 전력 에너지 소비 증가 역시 두드러지고 있다.

최근까지 온실가스 감축을 위한 노력에 대한 연구관점이 주로 전기에너지 공급자 측면에서 검토되었고, 전기에너지 수요자 측면에서는 검토가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기존의 전력 판매를 목적으로 한 태양광 발전사업자 입장에서의 분석에서 벗어나 태양광발전으로 발전된 전기에너지를 자가 소비하는 자가소비자 측면에서의 태양광발전 시스템의 운영 결과 분석 방법과 운영사례를 제시하고자 한다. 자가소비형 태양광발전 시스템의 운영 사례 분석 대상으로 제주첨단과학기술단지 내 기 건축물인 3개 빌딩의 옥상 태양광발전 시스템 4개를 선택하였다. 이 태양광발전 시스템들의 운영 효과 분석을 통해 자가소비자 입장에서의 경제성 분석과 이용률, 온실가스배출 감축 효과 등을 검토하고자 한다.

1.2 선행 연구의 고찰

태양광발전 시스템에 대한 설계, 시공, 운영, 유지보수 및 경제성 분석에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있으며 최근의 기후 위기와 관련하여 여러 분야에서 심층적으로 연구가 수행되고 있다. 하지만 발전시스템의 운영 결과 고찰에 관한 연구는 상당한 시간이 소요되어 상대적으로 연구 사례가 많지 않다. 기존의 경제성 분석과 예측에 관한 연구는 발전사업자 측면에서 검토가 진행되고, 본 연구에서와 같이 빌딩의 유희부지인 옥상을 활용한 자가 태양광발전 시스템에 관한 연구는 실질적인 사례가 많지 않다. 태양광발전 시스템의 운영 결과와 관련된 선행 연구에 대해 고찰해 보면, 연구 [8]은 태양광발전 시스템의 모듈 및 PCS (Power Conditioning System)의 성능개선, 시스템의 설계시공 및 사후 운영관리의 유용성을 위해서 계측데이터를 이용한 태양광발전 시스템의 성능 특성을 평가 분석하였다. 50kW급 계통연계형 태양광발전 시스템으로 곡면형 평지붕 방식, 경사각 18°, 방위각 5°(남동)인 시스템에 감시계측시스템을 설치하여 2005년 9월부터 2006년 8월까지 수집된 데이터를 분석하여, 중규모 이상의 태양광발전 시스템은 PR (Performance Ratio)이 75% 이하인 경우 태양광발전 시스템의 고장 혹은 이상 등으로 발전성능이 떨어진다는 것으로 보고하였다[8]. 연구 [9]는 제주대학교 건물 옥상에 설치된 29.5° 경사 고정식 약 1MW 용량의 태양광발전소의 2012년 5월부터 2014년 2월까지의 시간대별 발전량 데이터 분석을 통해 시간대별, 월별, 계절별 이용률과 피크시간대의 기여도 등을 얻었다. 제주대학교 태양광발전소는 일일 약 3,151kWh, 연간 약 115만 kWh의 전기에너지를 생산할 수 있는 규모이며, 여름철 전력사용량이 급증하는 피크시간대에 기여도가 48%로 비교적 높은 기여도를 보여주었다. 변압기 손실이 발전량에 비례하는 경향을 보여주었으며, 여름철 기온의 증가 시에 발열이 원활하지 않기 때문에 손실이 증가함을 보였다[9]. 연구 [10]은 계통한계가격의 특성과 제주도와 육지부의 계통한계가격 차이를 검토하고, 실제 판매단가인 kWh당 판매 가격을 비교·분석하며, 연도별 계통한계가격 변동이 태양광발전소의 전기에너지 판매금액에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 2012년부터 2015년까지 7월과 8월, 2달 동안 제주대학교 1MW 태양광발전소의 발전량과 제주도의 계통한계가격을 조사, 분석한 결과는 계통한

계가격과 태양광발전소의 발전량과의 연관성이 형성되지 않음을 보여주었다. 전력수요가 많아 계통한계가격이 높게 형성되는 시간대에 태양광발전이 주로 이루어지기 때문에 태양광발전이 다른 신재생에너지원 발전에 비해 유리한 면을 갖고 있다고 보았다[10]. 연구 [11]은 대학 캠퍼스 건물 중 공동주택 용도의 기숙사 건물을 대상으로 태양광발전 시스템을 설치했을 때의 경제성 평가와 초기 투자비, 연간 발전량, 전력 판매단가 등을 분석해 투자 회수 기간과 최적 설치 및 운영 기법을 도출하였다. 3개의 대안이 분석되었고 대안 1. 설치 보조금, 전기요금 할인, 대안 2. 고정가격 계약 대안 3. PPA (Power Purchase Agreement) 계약이었으며 3가지 대안에 대해 경제성 분석을 진행하였다. 대안 2의 경우 신재생에너지 공급인증서의 가중치를 높게 받을 수 있는 대상 건물의 경우 경제성이 높게 나타남을 보였다[11]. 연구 [12]는 진천 친환경에너지타운 내 신재생에너지 시스템 중 태양광발전 시스템에 초점을 맞추어 2018년 1월부터 2020년 12월까지의 태양광발전 데이터를 이용하여 설비이용률, 발전수익, 온실가스 저감량 등을 분석하였다. 진천 친환경에너지타운 내 850kW급 태양광발전 시스템은 연평균 발전량은 1076.8MWh, 설비이용률 연평균 14.5%를 보였다. 발전수익은 2018년 222.6 백만 원, 2019년 200.9 백만 원, 2020년 178.4 백만 원이며, 연평균 30년생 소나무 숲 45.5 ha가 흡수하는 탄소량을 절감하며, 이는 승용차 약 202대가 연간 배출하는 이산화탄소량에 해당한다고 보고하였다[12]. 이 외에도 경제성에 대한 예측, 발전용량의 최적화 기법, ESS 용량산정 등 태양광발전 시스템에 대한 많은 분야의 연구가 진행되고 있다.

본 연구가 태양광발전 시스템에 대한 기존 연구와 차별되는 부분은 기존 연구의 전력 판매용 발전사업자 측면에서의 분석에서 벗어나 자가소비자 측면에서의 실제 운영 결과 데이터를 토대로 경제성 분석과 발전특성을 분석한다는 것이다.

1.3 연구 내용

본 연구의 내용은 서론, 본론과 결론을 포함하여 총 5장으로 구성하였다.

1장에서는 연구의 배경 및 목적, 연구의 내용 및 선행연구의 고찰에 대해서 기술한다. 2장에서는 태양광발전의 개요와 활용에 대해 살펴보고, 3장에서는 일반적인 태양광발전 시스템 성능평가를 위한 설비이용률 계산 방법과 발전 시간의 개념, 피크시간대의 태양광발전 이용률 계산 방법을 설명하고, 환경 측면에서의 분석을 위해 온실가스배출 감축 효과의 분석 방법에 관해서 설명한다. 태양광발전 전에 있어 발전사업자의 수익 창출 구조를 짚어보고 본 연구에서 제시하고자 하는 자가소비자 입장에서의 발전수익을 산정함에 있어 기준이 될 전기요금의 체계에 관해서 설명하였다. 이에 자가소비형 태양광발전시스템에 있어서 발전수익의 산정의 구체적 방법과 자가소비형 태양광발전시스템 분석 방법 절차를 제시한다. 4장에서는 3장에서의 분석 방법 절차를 적용하여 사례 연구를 진행한다. 연구대상의 설치 위치와 설비 제원, 연구 대상 위치의 기상 조건과 설치 환경에 대해 다루고, 연구 방법에서 언급하였던 방법론을 가지고 연구대상의 발전량에 따른 전기요금 절감 분석과 제주지역 전기요금 체계의 개편으로 인한 영향, 누적 발전량을 통해 경제적 측면의 분석을 진행하였다. 성능평가 분석을 위해 설비이용률 계산과 기상 조건과 설치 환경의 영향, 피크시간대 태양광발전 이용률 등을 살펴보았다. 아울러 기후 위기의 대응책으로서의 분산 전원의 사용으로 인한 온실가스배출 감축의 효과에 대한 결과를 검토해본다. 또 사례 연구에 대한 결과 고찰을 논한다. 5장에서 본 논문의 연구 결과를 요약하고 연구의 의의와 시사점을 제시한다.

2. 태양광발전 시스템의 개요

2.1 태양광발전의 개념

태양광발전은 태양광을 직접 전기로 변환시키는 발전방식으로, 태양전지를 패널 형태로 제작한 태양광 모듈과 채택된 하부 시스템의 설치에 따라 구성이 다양하지만, 전력저장 기능의 축전 장치, 태양전지에서 발전한 직류를 교류로 변환하는 전력변환장치인 PCS, 시스템 제어 및 모니터링과 부하로 구성되어 있다. Fig. 1은 태양광발전 시스템의 구성을 나타낸다.

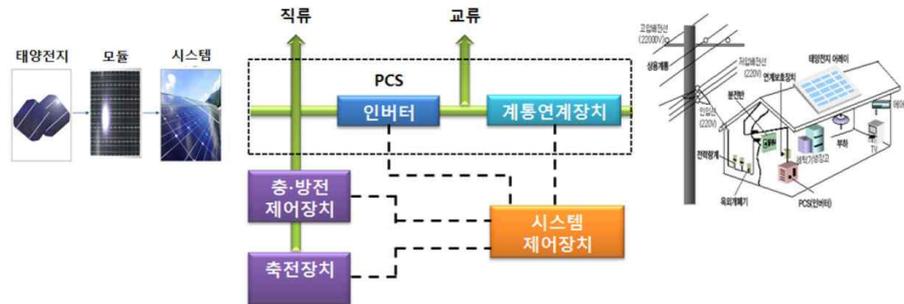


Fig. 1 Configuration of photovoltaic systems [13]

태양광발전 시스템의 구성요소 중 가장 핵심적인 부품은 태양전지이다. 태양전지는 p형과 n형 반도체를 접합시키고 앞뒤 표면에 금속 전극을 붙여 제작한다. 태양전지에 햇빛을 비추면 광전효과에 의해 전자와 정공이 만들어지고 전자와 정공은 p-n 접합부에 존재하는 전기장의 영향으로 서로 반대 방향으로 흘러간다. 전자는 n형 반도체에, 정공은 p형 반도체에 달라붙어 n형 반도체와 p형 반도체 표면 전극에 전위가 발생한다. 따라서 도선으로 연결된 외부회로에 전기가 발생하게 된다. Fig. 2는 태양전지의 기본 구조와 작동 원리를 나타낸다.

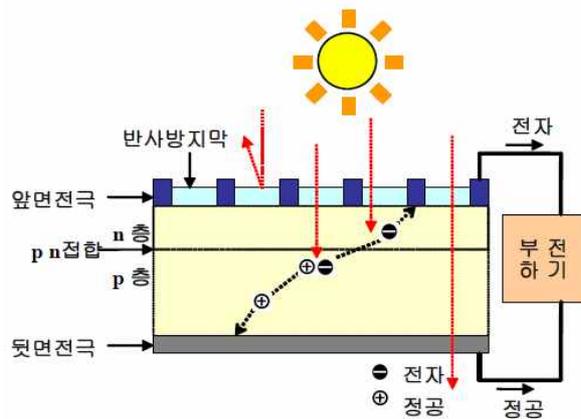


Fig. 2 Basic structure and operating principles of solar cells [13]

2.1 태양광발전의 활용

우선 태양광발전 시스템이 적용되는 부하는 다양한 형태가 존재하며, 부하의 종류에 따라 지상용 시스템과 우주용 시스템으로 나뉘며, 지상용 시스템은 계통 연계형 시스템과 독립형 시스템으로 분류할 수 있다. 그리고 다른 신재생에너지 시스템(풍력, 지열, 가스, 바이오, 연료전지, 2차전지 등)과 결합한 시스템이 있다. 독립형 시스템에서 오지, 도서 지역의 주택에 전력을 공급하는 가정용 독립형과 통신, 펌프 시스템 등에 소규모 전력을 공급하는 비가정용 독립형이 있으며, 계통연계형 시스템은 주택과 건물에 전력을 공급하는 분산배치 계통연계형과 발전소 대치 또는 배전망 보강용으로 설치되는 집중배치 계통연계형이 있다.

이처럼 태양광발전 시스템은 다양한 설치 환경에 따라 여러 가지 용도로 사용되며, 대규모 발전소의 경우 발전단가 측면에서의 장점이 있지만 넓은 설치 부지와 송배전망을 확보해야 한다. 따라서 별도의 공간 확보가 필요하지 않은 환경 맞춤형 태양광발전 보급도 확대되고 있다. 주택형의 경우 단순 지붕 부착형에서 주택 디자인과의 일체화를 추구하는 제품도 최근에 개발되고 있다. 주차장 부지를 활용하는 경우 별도의 공간이 불필요하며 주차 편의를 증대할 수 있는 장점이 있다. 건물에 적용하는 경우에 세부적으로 분류하자면, 가장 흔히 볼 수 있는 건축물 옥상 등에 설치하는 건물설치형, 건축물 경사 지붕 또는 외벽 등에 밀착하여 설치하는 건물부착형, 건축자재와 태양광 패널의 기능이 합해져 일체화된 건물일체형이 있다.

최근 대도시 중심으로 보급되고 있는 아파트 베란다형 태양광의 경우도 건물에 부착한 태양광 모듈의 한 형태로 도심지역에서 적용 가능한 기술로 주목받고 있다. 한편 농사도 짓고 발전도 하는 영농형 태양광과 저수지나 댐을 이용하는 수상 태양광, 이동형 충전기용 태양광, 자동차용 태양광, 항공 우주용 태양광 등 다양한 활용이 있다[13].

본 연구에서는 빌딩에서의 일반적인 형태인 옥상에 고정경사식의 옥상 태양광 발전시스템을 대상으로 하여 운영 사례를 짚어보고, 발전량에 따른 효과 분석을 진행하였다.



Fig. 3 The applications of photovoltaic [13]

3. 태양광발전 시스템 운영 결과 분석 방법

3.1 설비이용률과 피크시간대 태양광발전 이용률

발전설비의 이용률(Capacity Factor)은 대상 기간 동안 정격출력으로 연속하여 운전할 때 출력량에 대해 실제 운전했을 때의 출력량의 비율을 말한다. 이용률은 발전원의 종류와 발전소의 설계방식에 따라 다양하며, 일정 기간 중 설비의 정상적 가동시간의 전체 시간에 대한 백분비를 나타내는 가동률(Availability Factor)과는 구분된다[14]. 하루 24시간을 기준으로 한다면 식 (1)과 같이 24시간 중 정격출력으로 발전한 시간의 비율을 말하며,

$$CF_{1day} = \frac{PG_{1day}}{NC \times 24hours} \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서, CF_{1day} 는 일간설비이용률[%], NC (Nameplate Capacity)는 설비용량[kW], PG_{1day} 는 1일 발전량[kWh]을 말한다. 발전 시간에 대해서 태양광발전의 관점에서 본다면 하루 중 햇빛이 떠 있는 시간에만 발전이 되므로 하루 동안 만들어낸 전기에너지의 총량을 시간당 최대로 만들 수 있는 전기에너지 즉, 설비용량으로 나누면 그것이 태양광발전의 발전 시간이라고 할 수 있다. 식 (2)에 나타난 바와 같이 발전 시간은 시간당 최대로 발전할 수 있는 발전량 대비 하루 동안 발전량 총량의 비율을 의미하며,

$$T_g = \frac{PG_{1day}}{NC} [hours] \quad (2)$$

여기서, T_g 는 발전시간을 의미한다.

태양광발전은 구름 또는 건물 구조물에 의한 그늘, 기후 상황 등 설비이용률에 영향을 주는 요인이 많아 일반적으로 식 (3)과 같이 연간 기준으로 계산이 되나, 본 연구에서는 2021년 발전량을 기준으로 월간 기준으로 태양광 경사각과 계절에 따라 설비이용률이 변화 패턴을 보고자 식 (4)와 같이 계산 및 분석을 진행하였다.

$$CF_{1year} = \frac{PG_{1year}}{NC \times (365 \text{ days}) \times (24 \text{ hours/day})} \times 100 [\%] \quad (3)$$

$$CF_{1month} = \frac{PG_{1month}}{NC \times 24 \text{ hour} \times N_{1month}} \times 100 [\%] \quad (4)$$

여기서, CF_{1year} 는 연간설비이용률[%], CF_{1month} 는 월간설비이용률[%], PG_{1year} 와 PG_{1month} 는 각각 연간, 월간발전량[kWh], N_{1month} 는 한달일수[days]를 말한다.

국내 전력수급기본계획에서는 신재생에너지원별로 피크기여도를 제시하고 이를 이용해서 각 발전원의 실효용량을 계산한다. 설비이용률이 특정 시간 동안의 발전량과 정격용량에 의해 정의되는 척도인 반면, 실효용량은 피크전력 수요 시점에 동원될 수 있는 발전용량이라는 점에서 차이가 있다[15]. 본 연구에서도 각 건축물의 분산 전원을 활용하여 전력 소비 절감뿐만 아니라 부하관리에 있어 피크 감축에 대한 비율을 계산하였다. 먼저 각 빌딩의 2022년 월별 최대전력수요 추이를 확인하고, 최대전력 수요에 해당하는 월의 시간별 최대전력 현황을 확인한다. 이를 통해 피크시간대의 태양광발전 데이터를 분석하여 피크시간대의 태양광발전 이용률을 계산하였다. 식 (5)는 피크시간대 태양광발전 이용률 계산에 이용한 식이고, $CF_{Peaktime}$ 은 피크시간대의 태양광발전 이용률[%]이며, G_{ap} 는 피크시간대의 시간당 평균발전량[kWh/hour]을 의미한다.

$$CF_{Peaktime} [\%] = \frac{G_{ap}}{NC} \times 100 [\%] \quad (5)$$

3.2 온실가스배출 감축 효과 분석 방법

본 연구에서 적용한 에너지 소비에 의한 온실가스배출 감축 효과는 공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침의 [별표 7] 외부감축 사업 온실가스 감축량 산정 방법론에 명시되어 있는 조정 전력 배출계수 $0.45941 tCO_2eq/MWh$ 적용하여 온실가스배출 감축량을 계산하였다[16]. 또한 탄소 배출

감축 효과를 쉽게 비교하기 위해 산림청의 국내 주요 산림 수종의 표준 탄소흡수량 자료를 사용하였다. 산림청 자료에 따르면 우리나라의 대표적인 나무인 30년생 소나무 숲 1ha는 매년 10.8ton의 CO_2 를 흡수하며, CO_2 배출 1ton 상쇄에 필요한 소나무 평균 식재 그루 수는 7.16그루라고 한다[17, 18]. 이 지표를 기준으로 본 논문의 연구대상인 각 빌딩 옥상 태양광 발전시스템의 연간 발전량에 해당하는 온실가스배출 감축 효과를 분석하였다.

3.3 태양광발전의 수익 창출 구조

3.3.1 발전사업자 측면에서의 수익 창출 구조

태양광발전 시스템을 계통전력과 연계하여 신재생에너지 발전사업자 측면에서의 수익 창출 구조는 전력판매수익과 공급인증서판매수익의 합으로 계산될 수 있다. 전력판매수익은 한국전력공사 또는 한국전력거래소와 전력판매계약을 통해 생산된 전력을 판매하여 얻는 수입이며 식 (6)로 나타내어질 수 있다.

$$\text{전력판매수익(원)} = \text{발전량}(kWh) \times \text{계통한계가격(원/kWh)} \quad (6)$$

여기서 계통한계가격 (SMP : System Marginal Price)은 거래 시간별로 적용되는 전력량에 대한 전력시장가격(원/kWh)을 말하며 육지와 제주지역으로 구분되며 참여하는 발전기들의 변동비용 즉 연료비용을 고려하여 책정되는 전기 도매가격을 말한다. 매시간 발전단가가 저렴한 발전기부터 비싼 순으로 수요에 맞추어 투입되기 때문에 수요와 공급이 일치될 때 가장 비싼 연료를 사용한 발전기가 한계 가격 결정 발전기가 되고 이때의 한계가격이 그 시간대의 시장가격으로 결정된다. 계통한계가격은 여러 가지 요인에 의해 결정된다. 발전기 측면에서 보면 발전기 효율 및 발전기 연료비용에 영향을 받고 기타 요인으로는 연료비용에 영향을 미치는 환율 및 유가가 있다. 우리나라 계통한계가격은 대부분 LNG (Liquefied Natural Gas) 발전기에서 결정되며 특히 유가의 경우 LNG 가격 결정에 매우 중요한 요소이다[19].



Fig. 4 SMP pricing process

Fig. 4과 같이 우리나라의 LNG 도입 가격은 두바이유 원유가격을 따라 3개월 시차를 두고 영향을 받는 JCC (Japan Crude Oil), ICP (Indonesia Crude Price) 등에 연동되어 결정된다. JCC, ICP이 등락이 국내 LNG 원료비에 영향을 미치기 까지 약 1개월이 소요되고 LNG 가격이 계통한계가격에 영향을 미치는데 1개월의 시차가 있으므로 두바이유의 등락이 국내 계통한계가격에 영향을 미치는 데 까지 약 5개월이 소요된다[19]. Fig. 5는 2021년 기준 월별 육지와 제주지역의 계통한계가격 추이를 보여준다.

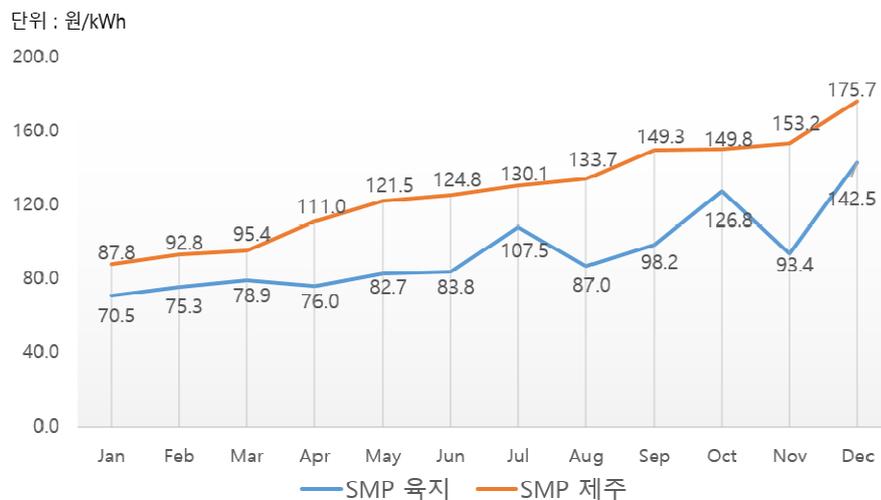


Fig. 5 Weighted average SMP of Main-land and Jeju by month in 2021

공급인증서판매수익은 신재생에너지 발전량에 대해 신재생에너지 공급인증서 (REC : Renewable Energy Certificates)를 발급받고 공급의무자와 거래를 통해 얻는 수입이며 식 (7)로 나타내어질 수 있다.

$$\text{공급인증서판매수익} = \text{REC 거래수량}(\text{REC}) \times \text{REC 판매가격} \quad (7)$$

REC는 신재생에너지 설비를 이용하여 에너지를 공급하였음을 증명하는 인증서를 말하며, 공급인증서의 발급 및 거래단위로서 공급인증서 발급대상 설비에서 공급된 MWh 단위의 신재생에너지 전력량에 대해 가중치를 곱하여 결정된다. 설비별 가중치는 신재생에너지원별, 설치유형 및 용량에 따라 달라지며 그 내용은 Table 1과 같다. REC는 계약시장 또는 현물시장, 고정가격계약 입찰제도, 한국형 FIT (Feed-In Tariffs)를 통해서 거래할 수 있다.

Table 1 REC weight by renewable energy source [19]

구분	공급인증서 가중치	대상에너지 및 기준	
		설치유형	세부기준
태양광에너지	1.2	일반부지에 설치하는 경우	100kw미만
	1.0		100kW부터
	0.7		3,000kW초과부터
	1.5	건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우	3,000kW이하
	1.0		3,000kW초과부터
	1.5	유지 등의 수면에 부유하여 설치하는 경우	
	1.0	자가용 발전설비를 통해 전력을 거래하는 경우	
	5.0	ESS설비(태양광설비 연 계)	'16년, '17년, '18년(6월30일까지)
기타 신·재생에너지	0.25	IGCC, 부생가스	
	0.5	폐기물, 매립지가스	
	1.0	수력, 육상풍력, 바이오에너지, RDF 전소발전, 폐기 물 가스화 발전, 조력(방조제 有), 자가용 발전설비 를 통해 전력을 거래하는 경우	
	1.5	목질계 바이오매스 전소발전, 해상풍력(연계거리 5km이하), 수열	
	2.0	연료전지, 조류	
	2.0	해상풍력(연계거리 5km초과), 지열, 조력(방조제 無)	고정형
	1.0~2.5		변동형
	5.5	ESS설비(풍력설비 연계)	'15년
	5.0		'16년
	4.5		'17년, '18년(6월30일까지)

3.3.2 자가소비자 측면에서의 수익 창출 구조

태양광발전 시스템을 통해 한전에 생산된 전기에너지를 한전에 판매하는 구조가 아닌 건물 또는 시설에서 자체 소비되는 시스템을 사용하는 경우 전기요금의 절감 정도에 따라 수익을 창출하는 구조로 생각해 볼 수 있다. 본 연구에서 연구대상인 제주지역 빌딩에서의 발전수익(전기요금 절감액)결정 방법에 앞서 전기요금의 구조에 관한 내용을 확인할 필요가 있다. 우리나라의 전기요금은 기본요금, 전력량 요금, 기후환경요금, 연료비조정요금으로 구성되어 있다. 사용하는 용도에 따라 구분되며 이 구분을 ‘계약종별’이라고 한다. 계약종별에는 산업 보호, 물가 관리 등 각종 정책이 반영되어 있고 그에 따른 요금의 차이도 있으므로 계약종별의 적용은 실제 전기를 사용하는 용도에 따라야 한다. Table 2는 용도별 전기요금체계를 보여준다.

Table 2 Electricity tariff classification by contract type [20, 21]

계약종별	전기사용용도
주택용	주거용, 계약전력 3kW 이하, 독신자합숙소나 집단 주거용 사회복지시설로서 고객이 희망하는 경우 등
일반용	주택용, 교육용, 산업용, 농사용, 가로등 이외의 고객
교육용	법령에 따른 학교, 도서관, 박물관, 미술관 등
산업용	한국표준산업 분류상 광업, 제조업 등
농사용	양곡 생산을 위한 양수, 배수펌프 및 수문 조작, 농사용 육묘 및 전조 재배, 농작물 재배·축산·양잠·수산물양식업 등
가로등	일반 공중의 편익을 위해 조명용으로 설치한 전등이나 교통신호등·도로표시등 등
심야	전기사용이 적은 심야시간대(밤11시~아침9시) 전기를 공급받아 가동하는 심야전력기기

전기를 언제, 얼마만큼 사용하는지에 따라 전기의 원가가 달라지기 때문에 계절별 시간별로 요금이 달라진다. Table 3은 계절별 시간대별 구분기준을 보여주는데 여기서 전력수요가 가장 높은 시간을 ‘최대부하’, 가장 낮은 시간을 ‘경부하’, 그 사이의 시간을 ‘중간부하’ 시간대라고 하며, 최대부하시간대 요금 단가가

가장 높고, 그다음 중간부하, 경부하 순서로 단가가 높게 된다. 이런 계절별 시간대별 차등 요금을 적용하는 대상은 Table 4에서 나온 것처럼 적용대상이 상이하다.

Table 3 Classification of season and time of use [21]

계절별 시간대별	여름철 (6월~8월)	봄·가을철 (3월~5월, 9월~10월)	겨울철 (11월~익년 2월)
경부하시간대	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
중간부하시간대	09:00~10:00	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	17:00~23:00	20:00~22:00
최대부하시간대	10:00~12:00	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	13:00~17:00	17:00~20:00
			22:00~23:00

Table 4 Application of differential electric energy tariff [21]

계절별 시간대별 차등 요금	산업용 (갑)Ⅱ, 산업용(을), 일반용(갑)Ⅱ, 일반용(을), 교육용(을)
계절별 차등 요금	산업용(갑) I, 일반용(갑) I, 교육용(갑), 농사용(을)

여기에 제주특별자치도의 경우 2021년 9월 1일부터 계절별 시간대별 구분기준을 전국에서 유일하게 별도로 정하여 적용하게 되었다. Table 5는 그 구분기준을 보여주고 있다.

Table 5 Season and time-of-use change in Jeju area('21.9.1 enforcement) [21]

계절별 시간대별	경부하시간대	중간부하시간대	최대부하시간대
전 계절	22:00~08:00	08:00~16:00	16:00~22:00

이는 2021년 6월 제주지역 계절별·시간별 요금제 시간대 개편안 시행 보도 자료에 따르면 제주지역의 최근 몇 년 사이에 재생에너지 보급이 확대되면서 전력 순부하(Net Load = 총 부하 - 재생에너지 발전량) 패턴이 육지 지역과 다른 형태로 변화되고, 태양광 보급이 늘어나면서 태양광 발전량이 많은 낮 시간대는 전

력수요의 상당 부분을 태양광발전이 부담하여, 낮 시간대 순부하는 감소하고 순부하가 최대인 시간대는 일몰 후 저녁으로 이동되어 일출과 일몰 사이 태양광발전량 증가로 순부하가 급감하여 나타나는 덕커브(Duck Curve) 패턴이 나타났다고 한다[22]. 이에 전국에 일괄 적용하던 계시별 요금제 시간대 구분을 제주지역에 한해 지역 순부하 패턴에 맞게 개편하게 되었다. Table 6은 변경된 제주지역 전기 요금제 시간대별 구분기준을 보여준다.

Table 6 Change time-of-use classification table in Jeju area

구분	현행		개정(안)
	봄·여름·가을철(3~10월)	겨울철(11~2월)	전 계절
경부하(10hr)	23:00~09:00	23:00~09:00	22:00~08:00
중간부하(8hr)	09:00~10:00	09:00~10:00	08:00~16:00
	12:00~13:00	12:00~17:00	
	17:00~23:00	20:00~22:00	
최대부하(6hr)	10:00~12:00	10:00~12:00	16:00~22:00
	13:00~17:00	17:00~20:00	
		22:00~23:00	

본 연구에서의 연구대상인 빌딩 옥상 태양광발전 시스템은 제주지역에 위치하기 때문에 이런 전기요금의 구조 변경에 따라 발전수익(전기요금 절감액)의 변화에 대해서 분석하고, 추가적인 분석을 4장 사례 연구에서 다루었다.

3.4 자가소비형 태양광발전 시스템 발전수익

본 논문의 연구대상인 옥상 태양광발전 시스템은 모두 건물의 전력공급용으로 사용되는 분산배치 계통연계형 시스템이다. 자가소비형 태양광발전의 경제성 분석을 위해서 각 건물에 적용되고 있는 계약종별 전력량 요금 단가를 가지고 산정하였다. 각 빌딩의 발전량 데이터는 2021년 발전량을 기준으로 하고, Table 7과 같이 계약 종별, 계절별, 시간별 요금 단가를 적용하여 산정하였다. 실제로 청구되는 전기요금에는 계약전력에 따른 기본요금과 전력사용량에 따른 기후환경요금, 역률 요금, 부가가치세 10%와 전력산업기반기금 3.7%가 포함되어 계산되

지만 본 연구에서는 태양광발전 시스템에서 생산된 전력량만큼 자체적으로 소비하였을 경우 절감된 전력량에 해당하는 전력량 요금 절감 정도를 가지고 분석을 진행하였다.

Table 7 Energy charge by season, time-of-use and contract type

스마트, 엘리트빌딩		산업용(을) 고압A 선택 I 일반용(을) 고압A 선택 I			
	1~2월	3월~5월	6월~8월	9월~10월 ¹⁾	11월~12월
경부하	23:00~09:00 (68.60)	23:00~09:00 (61.60)	23:00~09:00 (61.60)	22:00~08:00 (61.60)	22:00~08:00 (68.60)
중간부하	09:00~10:00 12:00~17:00 20:00~22:00 (114.70)	09:00~10:00 12:00~13:00 17:00~23:00 (84.10)	09:00~10:00 12:00~13:00 17:00~23:00 (114.50)	08:00~16:00 (84.10)	08:00~16:00 (114.70)
최대부하	10:00~12:00 17:00~20:00 22:00~23:00 (172.20)	10:00~12:00 13:00~17:00 (114.80)	10:00~12:00 13:00~17:00 (196.60)	16:00~22:00 (114.80)	16:00~22:00 (172.20)
세미양빌딩		일반용(을) 고압A 선택 II			
	1~2월	3월~5월	6월~8월	9월~10월 ¹⁾	11월~12월
경부하	23:00~09:00 (63.10)	23:00~09:00 (56.10)	23:00~09:00 (56.10)	22:00~08:00 (56.10)	22:00~08:00 (63.10)
중간부하	09:00~10:00 12:00~17:00 20:00~22:00 (109.20)	09:00~10:00 12:00~13:00 17:00~23:00 (78.60)	09:00~10:00 12:00~13:00 17:00~23:00 (109.00)	08:00~16:00 (78.60)	08:00~16:00 (109.20)
최대부하	10:00~12:00 17:00~20:00 22:00~23:00 (166.70)	10:00~12:00 13:00~17:00 (109.30)	10:00~12:00 13:00~17:00 (191.10)	16:00~22:00 (109.30)	16:00~22:00 (166.70)

1) 21년 9월 1일부터 부하별 시간대 구분기준 변경 (Unit : WON/kWh)

분석에 이용한 식을 정리하면 하루 기준 부하별 발전량 총합은 식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 각 부하 시간대 발전량에 그 시간대의 전기요금 단가를 곱해 식 (9)에서와 같이 전기요금 절감분(발전수익)을 계산할 수 있다. 또, 연간 전기요금 절감분(발전수익)은 식 (10)을 통해 구할 수 있다.

식 (8)의 G_{T1day} 는 1일 발전량[kWh]으로 G_{ft}, G_{mt}, G_{ot} 는 각각 경부하, 중간부하, 최대부하 시간대 발전량[kWh]이다.

$$G_{T1day} = \sum_{ft} G_{ft} + \sum_{mt} G_{mt} + \sum_{ot} G_{ot} \quad [kWh] \quad (8)$$

여기서, 1일 발전수익(전기요금절감액)[원]인 R_{eday} 은

$$R_{eday} = \sum_{ft} G_{ft} \cdot B_{ft} + \sum_{mt} G_{mt} \cdot B_{mt} + \sum_{ot} G_{ot} \cdot B_{ot} \quad [원] \quad (9)$$

이고, B_{ft}, B_{mt}, B_{ot} 는 각각 경부하, 중간부하, 최대부하 시간대 전기요금 단가[원]이다. 연간 발전수익[원](연간 전기요금 절감액)인 R_{eyear} 은 식 (10)과 같으며,

$$R_{eyear} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^m R_{edayij} \quad [원] \quad (10)$$

i 는 월, j 는 일, m 은 월별일수를 말한다.

2021년에는 Table 7에서 나타나듯이 9월 1일부터 제주지역 부하별 시간대 구분기준이 변경되었다. 이에 개정 전과 개정 후의 구분기준을 2021년도 발전량 데이터와의 계산으로 전기요금의 절감 정도를 구분하여 추가적인 분석을 진행하였다. 이에 육지와 제주의 계약종별에 따른 전기요금 산정이 다른 부분을 고려하여 투자비용 회수 기간은 어느 정도 차이가 있는지에 대해서 고찰하고, 발전사업자 측면과 다르게 자가소비자 측면에서 태양광발전시스템에서의 경제성 분석 방법을 적용하고자 한다.

3.5 자가소비형 태양광발전 시스템 운영 결과 분석 절차

앞서 언급한 태양광발전 시스템의 일반적인 설비 성능 측면과 환경 측면의 분석 방법과 3.4절(자가소비형 태양광발전시스템 발전수익)에서 제시한 분석 방법

에 대한 절차를 Fig. 6과 같이 요약할 수 있다.

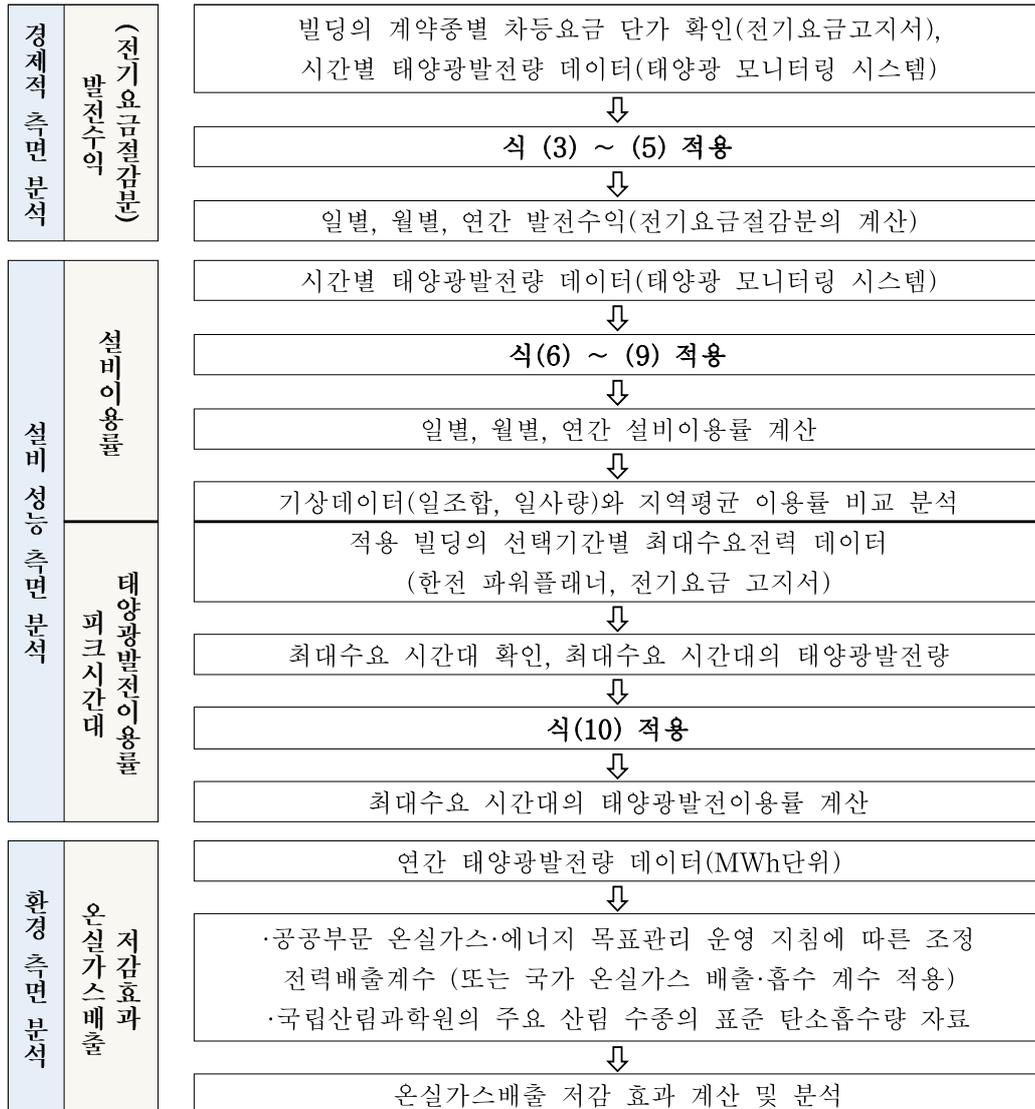


Fig. 6 Procedure of analysis method of self-consumption PV system

본 연구에서는 자가소비자 측면에서의 태양광발전시스템의 운영 결과 분석 방법 절차를 Fig. 6과 같이 제시하고 이 절차에 따라 4장에서 각 빌딩의 운영 결과에 대한 분석을 진행하였다.

4. 사례 연구

4.1 태양광발전 시스템 구성과 제원 및 설치환경

4.1.1 태양광발전 시스템의 설치위치 및 구성과 제원

연구대상인 빌딩이 위치한 제주첨단과학기술단지는 제주 산업구조의 자립도 향상 및 지역산업 활성화를 목적으로 2004년 10월 국가산업단지 지구 지정 및 사업시행자 지정, 2006년 12월 관리 기본 계획을 승인받아 2010년 6월 단지를 준공하였다. Fig. 7은 제주국제자유도시개발센터가 운영 중인 제주첨단과학기술단지 내 스마트빌딩, 엘리트빌딩, 세미양빌딩의 옥상 태양광 발전시스템을 보여준다.



Fig. 7 PV systems on the roofs of three buildings in the Jeju Science Park

3개 빌딩의 옥상 태양광발전 시스템 모두 건물설치형이며, 건물의 전력공급용으로 사용되는 분산배치 계통연계형 시스템이다. 연구의 배경이 된 제주첨단과학기술단지에는 Google Earth 위성지도에서 보면 Fig. 8과 같이 제주지역 중산간 위치에 있으며, Fig. 9에서 연구대상이 될 3개 빌딩의 위치를 보여주고 있다. 연구대상인 옥상 태양광발전시스템은 총 290kW급으로서, 3개의 빌딩 옥상에 설치되어 가동 중이다.

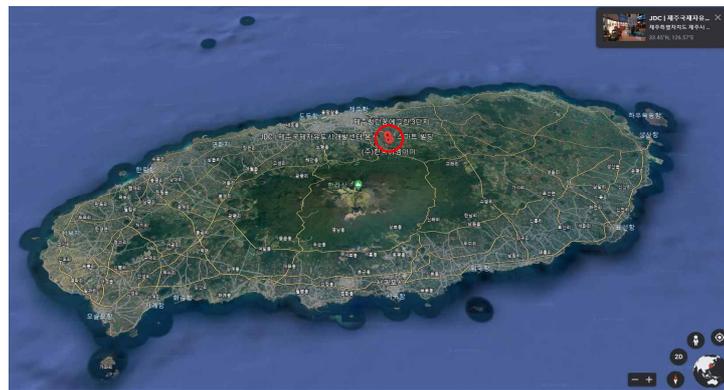


Fig. 8 Location of the Jeju Science Park [23]

스마트빌딩 $33.45^{\circ} N, 126.57^{\circ} E$	엘리트빌딩 $33.45^{\circ} N, 126.57^{\circ} E$	세미양빌딩 $33.44^{\circ} N, 126.57^{\circ} E$

Fig. 9 Location of the three PV systems [23]

각 빌딩에 대한 개요와 각 발전시스템의 용량 및 투자비용은 Table 8과 같다.

Table 8 Summary on the buildings and specifications of the PV systems

구분	스마트빌딩	엘리트빌딩	세미양빌딩
주요 구조	철근콘크리트 구조	철근콘크리트 구조	철근콘크리트 구조
층수	B1F ~ 5F	B2F ~ 5F	B1F ~ 5F
연면적	28311.3 m ²	19873.8 m ²	22634.3 m ²
주용도	업무시설 / 생산시설	업무시설	교육연구시설 / 제1종 근린생활시설
PV설비용량	75kW	45kW, 30kW	140kW
설치연도	2015년도	45kW : 2010년도 30kW : 2021년도	2020년도
투자비용	188(백만 원)	45kW : No Data 30kW: 92(백만 원)	354(백만 원)
설치 위치	B동 옥상	옥상	A동 옥상

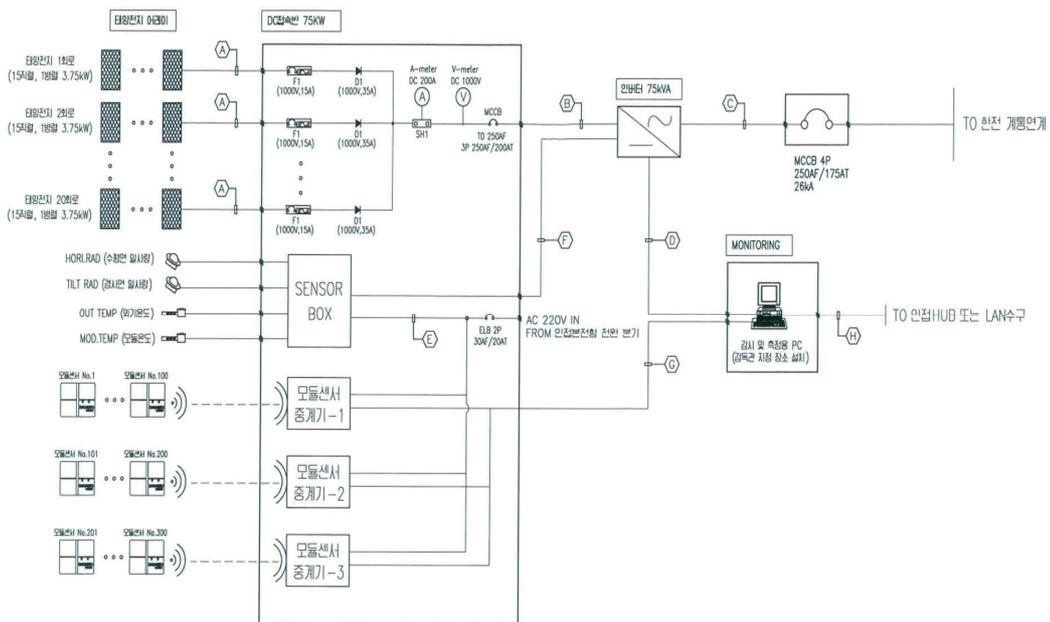


Fig. 10 Configuration of the Smart Building 75kW PV system

Fig. 10는 대표적으로 스마트빌딩의 75kW급 태양광 발전시스템의 구성을 보여주고 있다. 각 빌딩의 태양광 발전시스템 설비 구성은 Fig. 10과 같이 태양광 어레이와 DC 접속반을 거쳐 각 시스템의 인버터를 통해 전기실의 수변전설비 저압반에 연결되어 각 부하 설비로 전력을 전달하는 구성으로 설치되어 있으며, 스마트빌딩 태양광발전 시스템 75kW급은 15 직렬, 20 병렬 구성으로 300장의 모듈이 설치되어 있고, 엘리트 빌딩 태양광발전 시스템 45kW급은 221W 모듈 204장, 30kW급은 9 직렬, 8 병렬 구성으로 420W 모듈 72장, 그리고 세미양빌딩 태양광발전 시스템 140kW급은 14 직렬, 14 병렬 구성과 14 직렬, 13 병렬 구성으로 370W 모듈 378장으로 구성되어 있다. Table 9은 각 빌딩의 태양전지 모듈의 사양을 보여주며, Table 10은 각 태양광 발전시스템의 인버터 제원을 보여주고 있다.

Table 9 Specifications of the solar cell module

사 양	구 분			
	스마트빌딩 75kW	엘리트빌딩		세미양빌딩 140kW
		30kW	45kW	
제조사	에스에너지	한솔테크닉스	-	에스에너지
모델명	SN250P-11	HS420UE-AH2	-	SN370M-32
최대출력(P_{max}) [W]	250	420	221	370
최대출력동작전압(V_{mp}) [V]	29.7	43.7	29.1	39.8
최대출력동작전류(I_{mp}) [A]	8.42	9.62	7.6	9.29
개방전압(V_{OC}) [V]	37.3	53.2	39.0	47.5
단락전류(I_{SC}) [A]	8.86	10.13	8.38	9.76

Table 10 Specification of the inverters

구분		제 원	
스마트빌딩 75kW		제조사	(주)다스테크
		모델명	DSP-3375KT(75kW)
		DC MPP범위	220Vdc~700Vdc
		동작주파수	60Hz
		최대입력전압	700Vdc
엘리트빌딩	30kW	제조사	(주)에코스
		모델명	EK31
		용도	계통연계형
		DC MPP범위	200Vdc~800Vdc
		동작주파수	60Hz
		AC 동작전압	380Vac+N
	45kW	제조사	(주)다스테크
		모델명	DSP-3350K(53.5kW)
		DC MPP범위	450Vdc~820Vdc
		동작주파수	60Hz
최대입력전압		820Vdc	
세미양빌딩 140kW		제조사	(주)에코스
		모델명	EK75(75kW) x 2EA
		용도	계통연계형
		DC MPP범위	500Vdc~800Vdc
		동작주파수	60Hz
		AC 동작전압	380Vac+N

4.1.2 태양광발전 시스템 위치의 기상조건과 설치 환경

태양광발전 시스템의 발전량은 어레이의 지지 형태 방식이나 경사각, 방위각에 의존하며, 설치 지역의 기상 조건에 따라 일사량 또는 일조시간에 비례함을 알 수 있다[24]. 그리고 발전량이 일사량보다는 일조시간 변수에 더 의존하여 비례적으로 연동됨을 보여주고 있다[25]. 이에 첨단과학기술단지 기상 조건을 살펴보기 위해 기상청 기상자료개방 포털에서 종관기상관측 중 표준지점번호 184 제주 기상관측소(위도 : 33.51, 경도 : 126.52, 해발고도 21m)의 데이터를 사용하였다.

Table 11는 184 제주 기상관측소 지점에서의 2010년~2021년간 기상 데이터를 보여주고 있다. Table 12은 연구대상의 위치와 가까운 산천단 방재 기상관측(위도 : 33.44, 경도 : 126.56, 해발고도 377m) 지점에서의 기상 데이터를 보여주고 있다.

Table 11 Meteorological data by year at Jeju automated synoptic observing system

표준지점번호 184 제주 기상관측소			
연도	평균기온(°C)	합계 일조시간(hr)	합계 일사량(MJ/m ²)
2011	15.6	1720.0	5053.8
2012	15.7	1693.4	4760.7
2013	16.5	1990.2	4963.4
2014	16.2	1755.5	4695.7
2015	16.7	1826.6	4861.2
2016	17.0	1718.4	4743.4
2017	16.8	1981.3	5193.9
2018	16.6	1939.7	5045.3
2019	16.8	1909.9	5007.0
2020	16.7	1890.3	5004.4
2021	17.5	1965.3	5080.2

Table 12 Meteorological data by year at Sanchendan automatic weather station

표준지점번호 329 산천단 관측소			
연도	평균기온(°C)	최고기온(°C)	최저기온(°C)
2011	12.6	33.7	-7.0
2012	12.1	32.9	-7.0
2013	13.0	34.6	-8.6
2014	12.7	32.1	-6.0
2015	13.1	34.6	-5.8
2016	13.6	32.4	-9.5
2017	13.2	34.1	-5.1
2018	13.1	32.5	-7.8
2019	13.2	32.1	-4.5
2020	13.2	33.6	-5.4
2021	13.9	31.8	-6.7

해발고도에서 차이로 인해 두 관측소의 연평균기온이 약 2~3℃ 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있고, 본 연구에서는 일조시간 합에 따른 설비이용률을 분석하고자 하므로 연구대상 중 3개 빌딩 중 최근에 설치된 엘리트 빌딩(30kW) 태양광 발전시스템에서 측정된 평균경사일사량 데이터와 184 제주 기상관측소 지점에서 측정된 2021년 월간 데이터가 필요하다.

Table 13는 184 제주 기상관측소 지점에서의 2021년 월간 기상 데이터이며, Fig. 11은 일조시간 데이터와 엘리트 빌딩(30kW) 태양광 발전시스템의 월간 평균경사일사량과의 경향성을 나타낸 것이다.

Table 13 2021 Monthly meteorological data at Jeju automated synoptic observing system

표준지점번호 184 제주 기상관측소			
2021년도 월간	평균기온(℃)	합계 일조시간(hr)	합계 일사량(MJ/m ²)
1월	6.8	96.5	216.4
2월	9.4	141.2	311.1
3월	12.5	177.0	453.6
4월	15.4	216.7	589.3
5월	19.0	231.5	645.5
6월	23.4	200.1	604.9
7월	27.8	171.5	551.1
8월	27.3	170.5	500.5
9월	24.9	129.3	368.5
10월	20.1	193.9	398.9
11월	14.0	151.2	273.2
12월	8.9	85.9	167.0

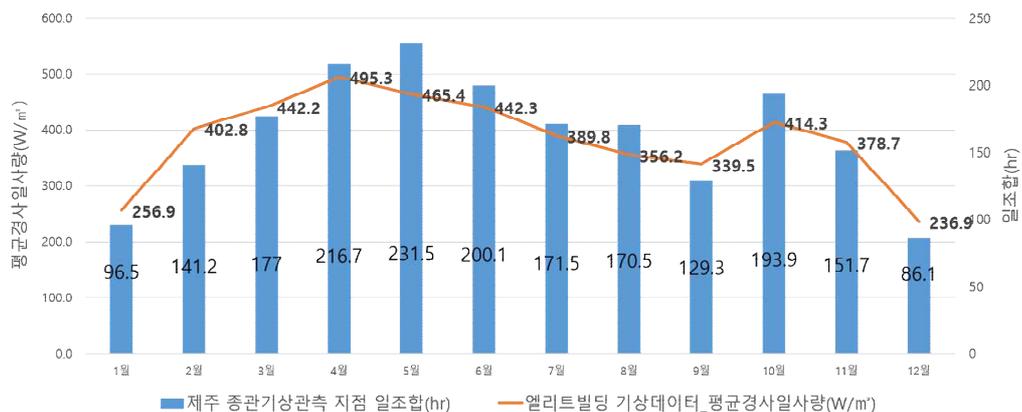


Fig. 11 Comparison of the average amount of solar radiation of the Elite Building with the hours of daylight at the 184 Standard Weather Observatory

Fig. 11에서 볼 수 있듯이 4월에서 5월의 일조시간 합이 증가하는 것과는 달리 실제 연구대상이 설치된 곳에서는 평균일사량은 감소하는 패턴을 볼 수 있고, 7~8월의 일조시간 합은 거의 수평을 이루는 반면, 평균경사일사량은 감소 패턴을 보인다. 이는 연구대상의 위치가 해발고도 약 340m에 있는 중산간에 위치해 있어 제주 관측지점과의 거리상 차이 및 날씨의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

3개 빌딩의 태양광발전시스템의 경사각은 Fig. 12에 나타내어져 있다. 스마트, 엘리트빌딩의 태양광 발전시스템의 방위각은 Fig. 13에 볼 수 있듯이 정남향을 향하고, 세미양빌딩인 경우 건물 구조상 동쪽으로 약 10° 틀어져 있음을 볼 수 있다.

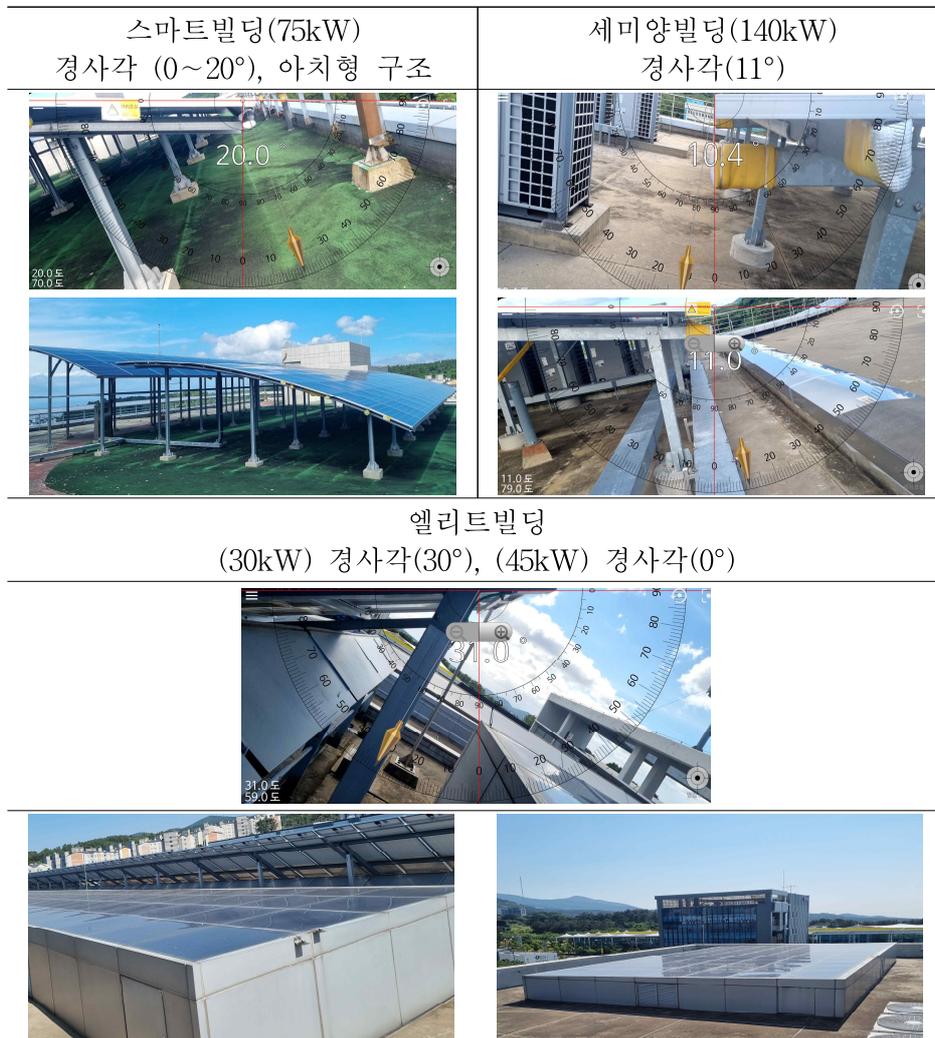


Fig. 12 Solar panel tilt angle of each PV system



Fig. 13 Solar panel azimuth angle of each PV system

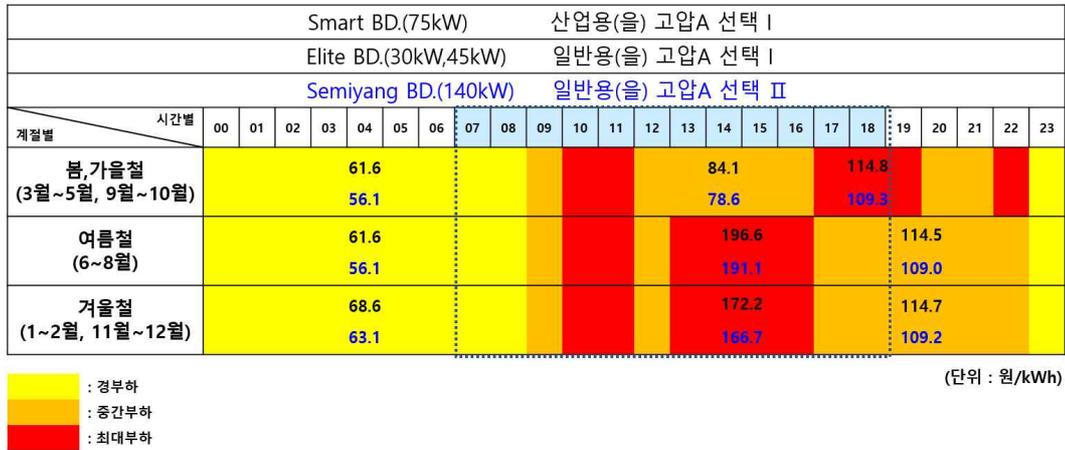
4.2 경제적 측면 분석

4.2.1 발전량에 따른 전기요금 절감 분석

3.4절(자가소비형 태양광발전 시스템 발전수익)의 Table 7에서 제주첨단과학기술단지 각 빌딩의 계약종별에 따른 계시별 전기요금 단가를 살펴보았다. 여기서 제주지역 전기요금 계시별 구분기준 변경에 따른 하루 24시간 기준 부하별 전기요금 단가 패턴을 Fig. 14에 나타냈다.

Fig. 14에서 볼 수 있듯이, 하루 중 07시~18시 태양광발전이 시작되는 시점에서 종료까지 구간을 보면 개정 후 중간부하의 요금에 적용되는 시간대가 확대되었음을 알 수 있다. 이는 2021년 기준으로 발전량에 개정 전·후 요금 단가의 적용에 따라서 전기요금 절감 정도가 달라지고 이는 향후 투자비용 회수 기간에도 영향을 미칠 수 있을 것을 예상할 수 있다. 이를 확인 하고자 2021년 각 시간대의 발전량에 계시별 전기요금 개정 전·후 규정을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

▶ 개정 전



▶ 개정 후



Fig. 14 Comparison of season & time-of-use energy rates during a day before and after rate revision



Fig. 15 Total energy generation by the PV systems in 2021

Fig. 15는 2021년도 각 빌딩의 옥상 태양광 발전시스템별 총발전량을 보여주고 있다. 이를 부하 구간별, 계시별 전기요금 개정 전·후 발전량을 비교하면 Fig. 16와 같다.



Fig. 16 Comparison of energy generation amounts in each time-of-use period according to the rules before and after the revision

발전량 부분에서 스마트빌딩은 개정 전과 후를 비교하면 경부하가 2.3% 감소, 중간부하가 43% 증가, 최대부하는 40.7% 감소하였고, 엘리트빌딩 45kW급은 경부하 3.6% 감소, 중간부하 48% 증가, 최대부하 44.5% 감소, 30kW급은 경부하 2.2% 감소, 중간부하 41% 증가, 최대부하 38.8% 감소 경향을 보였다. 그리고 세미양빌딩은 경부하 6.1% 감소, 중간부하 52.1% 증가, 최대부하 46% 감소하였다. 이에 비례하여 Fig. 17과 같이 전기요금 절감액 즉, 수용가 입장에서의 발전수익 역시 비슷한 경향성을 띠는 것을 볼 수 있었다.

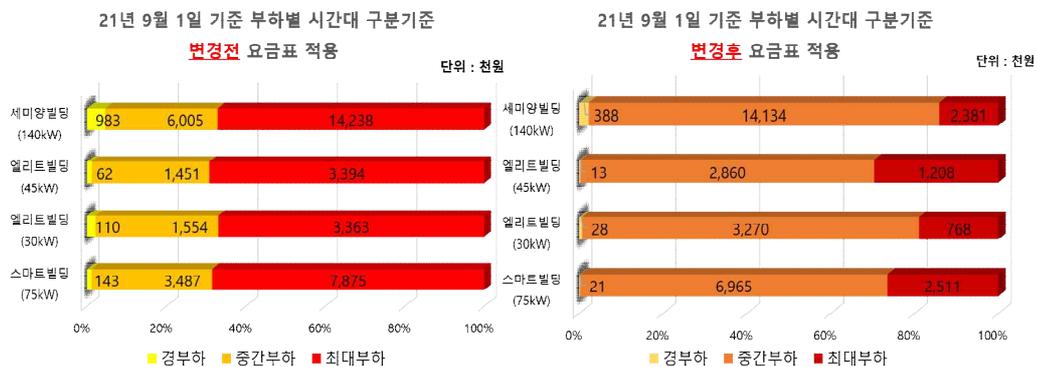


Fig. 17 Comparison of savings amounts of energy cost in the 3 time-of-use periods before and after the revision

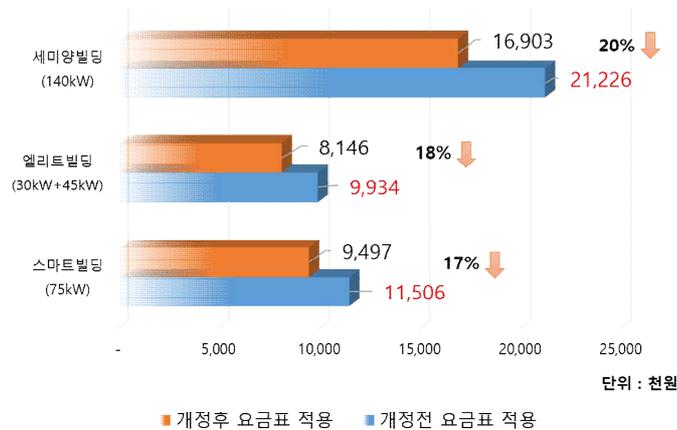


Fig. 18 Comparison of total electric energy cost savings before and after the revision

Fig. 18에서 보여주듯이 2021년도 태양광 발전량 데이터를 가지고 제주지역 계시별 전기요금 체계의 개정 전과 비교한 결과는 스마트빌딩의 경우 약 17%, 엘리트빌딩은 약 18%, 세미양빌딩의 경우 약 20% 전기요금 절감액이 감소하였다.

Fig. 19은 2021년 기준 전기사용량 대비 발전량과 전력량 요금을 비교한 그래프이다. 각 빌딩의 2021년도 한전 파워플래너 자료를 바탕으로 전기사용량 데이터를 확인해보면 스마트빌딩 1,604,663kWh, 엘리트빌딩 856,747kWh, 세미양빌딩 1,398,887kWh를 사용하였다[26]. 각 빌딩의 전기사용량 대비 연간 태양광 발전량은 스마트빌딩이 약 5.7%, 엘리트빌딩 약 9.2%, 세미양빌딩 약 13.0%의 비율을 보여주고 있다. 전력량 요금 대비 전기요금 절감액은 스마트빌딩이 약 6.2%, 엘리트빌딩 약 10.6%, 세미양빌딩 약 14.8%의 비율을 보여준다.

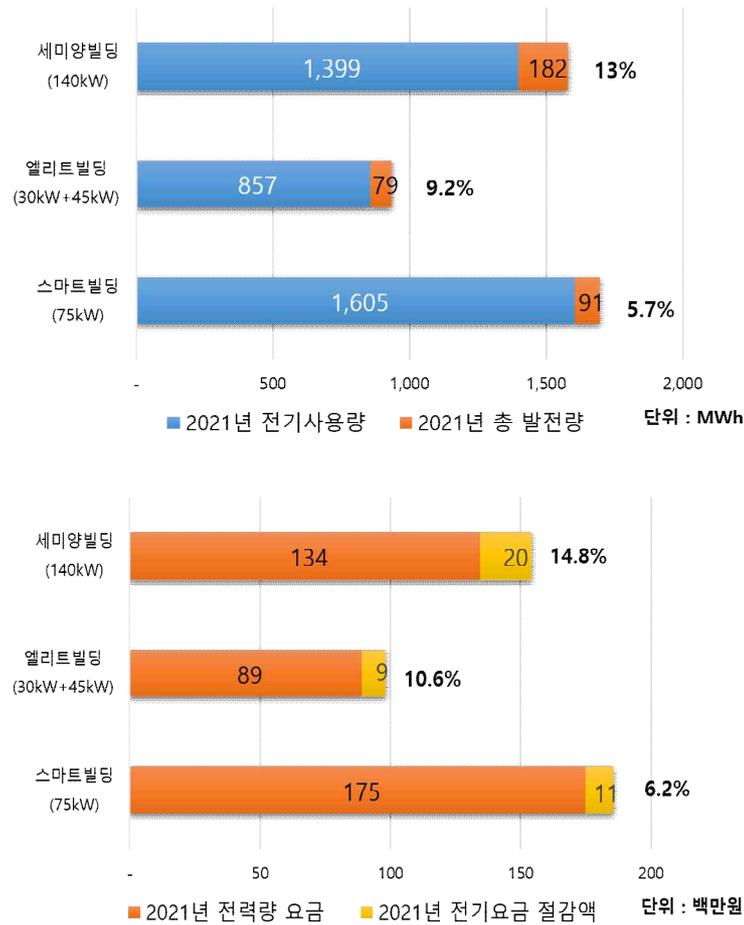


Fig. 19 Ratio of generation amount to consumed electric energy and ratio of saving amount to electric energy cost in each building in 2021

4.2.2 전기요금 체계 변화와 각 빌딩 전기요금

4.2.1절(발전량에 따른 전기요금 절감 분석)에서 제주지역의 계시별 요금제의 변경으로 인한 영향을 분석한 방법에 따르면 수용가 입장에서 제주지역 계시별 전기요금 개정으로 인해 빌딩 내의 전력사용량에 따른 전기요금의 변화가 있을 것이라 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위해 개정 전인 2021년 1월부터 8월까지와 2022년 동기간 전기요금의 부하별 전력사용량과 그에 따른 전기요금계를 비교한 데이터가 Fig. 20에 나타냈다.

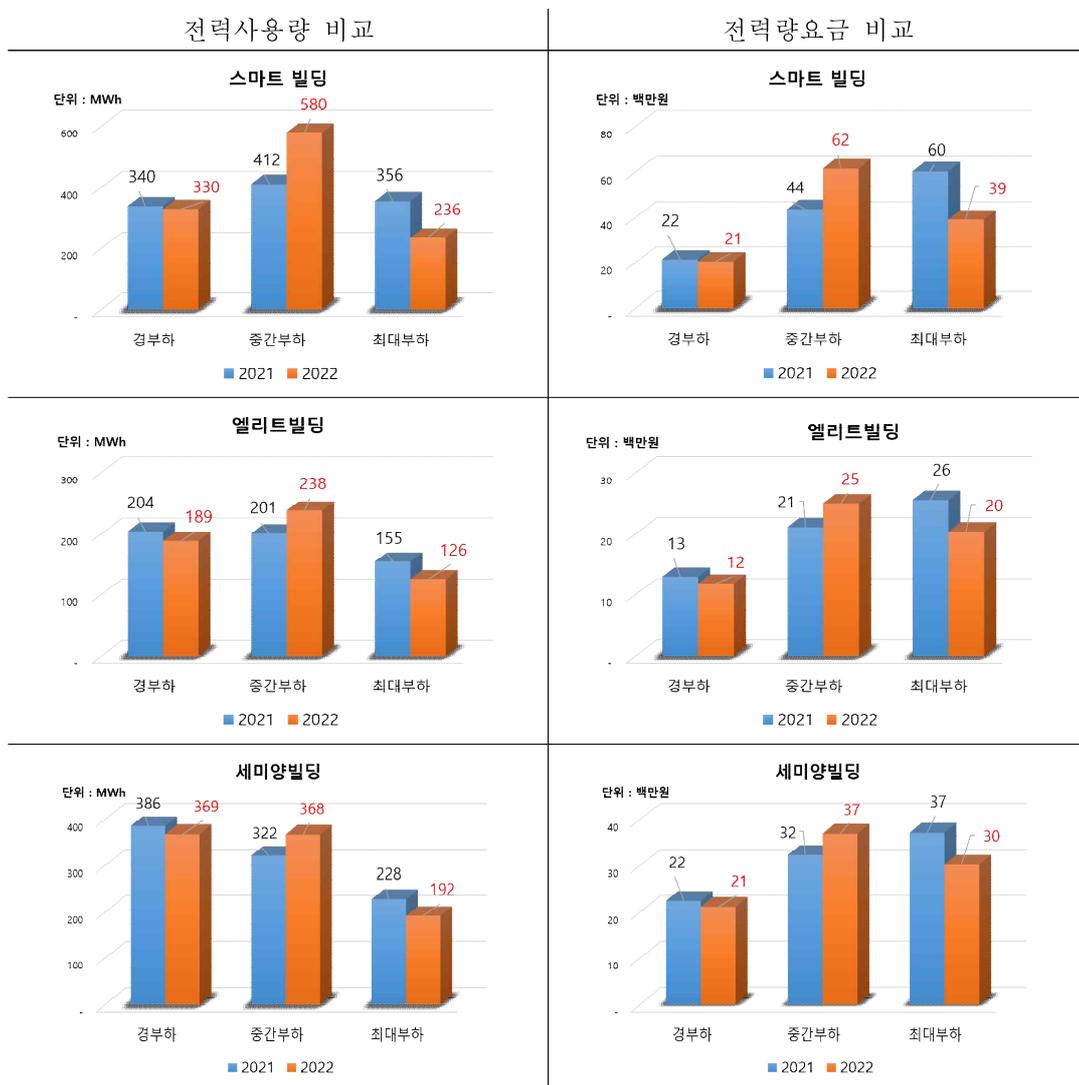


Fig. 20 Consumed electric energy amount and fee in each time-of-use period in 2021 and 2022

각 빌딩의 부하별 차이를 보면 Table 14와 같다.

Table 14 Change rate of electric charge amount of 2022 to 2021 year

구분	경부하	중간부하	최대부하
스마트빌딩	3% 감소	41% 증가	34% 감소
엘리트빌딩	8% 감소	18% 증가	19% 감소
세미양빌딩	4% 감소	14% 증가	16% 감소

Table 14에서 보면 앞에서 언급했던 제주지역 전기요금체계 개정 전·후 태양광발전량 패턴과 유사한 경향성을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 2021년과 2022년 1월에서 8월 총 전력사용량 비교와 금액 비교를 하면 Fig. 21과 같다.

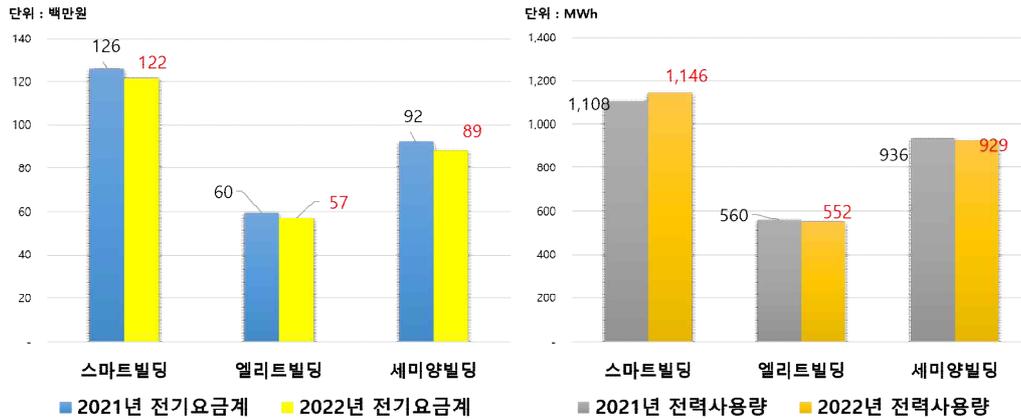


Fig. 21 Comparison of consumed electric energies amount and fees in 2021 and 202 year

Fig. 21에서 볼 수 있듯이 전력사용량에 따른 전기요금의 변화가 스마트빌딩 3.4%, 엘리트 빌딩 4.0%, 세미양빌딩 3.8% 정도로 금액으로는 스마트빌딩이 약 4백만 원, 엘리트빌딩 약 2백만 원, 세미양빌딩 약 3백만 원 정도 차이가 남을 볼 수 있었다. 전기요금 체계의 변화로 자가소비자 측면에서의 태양광발전으로 인한 수익이 줄어들지만 그만큼 빌딩의 전력사용량에 따른 요금도 어느 정도 감소 효과를 보여줬다. 하지만 태양광발전으로 인한 전기요금 절감과 전력사용량에 의한 절감의 효과는 변수가 다르다. 태양광발전은 적정한 유지보수 행위와 설치 위치의 일조량의 영향을 받으나, 빌딩의 전력사용량은 입주 인원 에 따른 부하량과 빌딩의 냉·난방 부하, 부하 사용 패턴 등 많은 변수가 존재한다.

4.2.3 누적 발전량과 경제성 분석

각 빌딩의 발전수익을 근거로 하여 운영 기간 대비 초기 투자비용 회수 기간을 분석하였다. 각 빌딩의 태양광 발전시스템의 발전개시로부터 2022년 9월까지 누적 발전량의 추이를 Fig. 22에서 볼 수 있다.

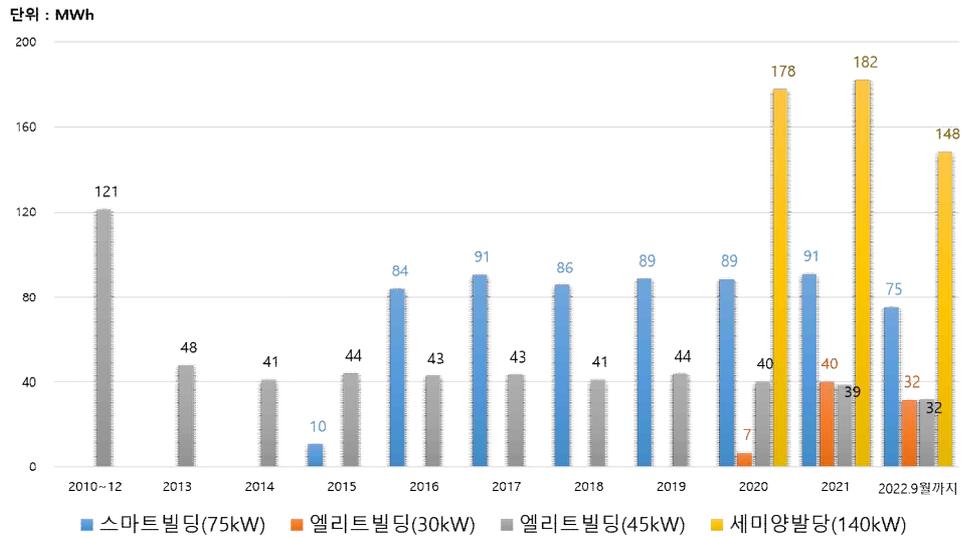


Fig. 22 Annual generation amount trend after generation started

3개 빌딩의 태양광 발전시스템의 발전개시로부터의 2022년 9월까지 누적 발전량과 운영 기간, 초기 투자비와 비교한 데이터를 Table 15과 Fig. 23에서 나타내었다.

Table 15 Cumulative generation amount and generation revenue after generation started

구 분	스마트빌딩 (75kW)	엘리트빌딩		세미양빌딩 (140kW)
		30kW	45kW	
누적 발전량(kWh)	614,013	78,682	535,902	508,698
초기 투자비용 (백만 원)	188	92	no data	354
총 누적 발전수익 (백만 원)	86	9	68	54
운영 기간	7년	2년	12년 9개월	2년 9개월

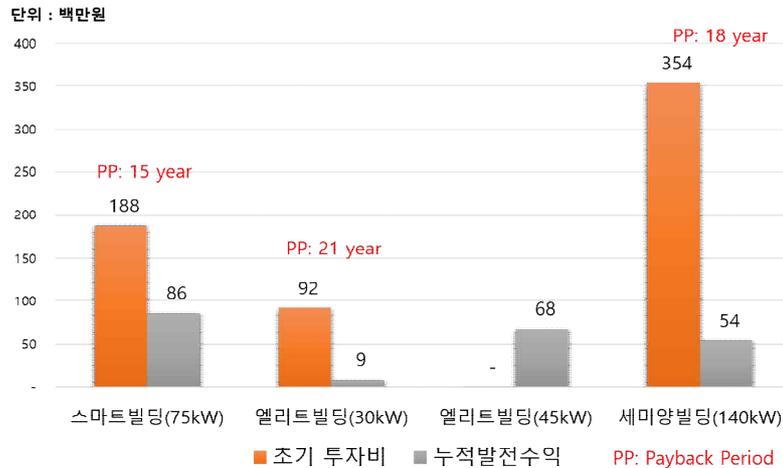


Fig. 23 Cumulative generation revenue and payback period of each PV system

Table 15의 운영 기간과 누적 발전량을 바탕으로 Fig. 23에 투자 회수 기간에 관한 내용을 나타내었다. 본 연구의 경제성 분석에 있어 연간 유지보수비, 물가 상승률, 이자율 등과 패널의 효율 저하에 대한 변수는 고려하지 않고 운영 기간에 따른 초기 투자비용 회수 기간을 산정하였다.

Fig. 23에서 운영 기간이 가장 긴 발전시스템은 엘리트 빌딩 45kW이며, 엘리트 빌딩 30kW급 태양광 발전시스템이 가장 최근에 설치되어 발전되고 있음을 볼 수 있다. 패널의 효율 저하를 고려하지 않고 각 태양광 발전시스템의 운영 기간에 따른 발전수익 대비 초기 투자비용 회수 기간을 산정해보면 스마트빌딩 75kW급이 약 15년, 엘리트빌딩 30kW급은 약 21년, 세미양빌딩 140kW급은 약 18년으로 추정되어 진다.

4.3 설비 성능 측면 분석

4.3.1 설비이용률

3.1절(설비이용률과 피크시간대 태양광발전이용률)에서 식 (3)을 이용하여 각 빌딩에서의 연간 설비이용률 계산하여 Table 16에 나타내었다. 스마트빌딩과 세미양빌딩, 엘리트빌딩 30kW급인 경우 설비이용률이 제주지역 평균과 비슷한 설비이용률을 보이지만, 엘리트빌딩 45kW급인 경우 상당히 낮은 이용률을 나타내었다.

Table 16 Annual capacity factor

구 분	연간 발전량 (kWh)	설비이용률 (%)	경사각 (°)
스마트빌딩(75kW)	90,873	13.83	0~20
엘리트빌딩(45kW)	38,749	9.83	0
엘리트빌딩(30kW)	40,236	15.31	30
세미양빌딩(140kW)	182,498	14.88	11

2021년 태양광 발전량을 바탕으로 월별 설비이용률과 184 제주 기상관측소 지점에서의 일조시간 합 데이터를 비교한 그래프가 Fig. 24과 같다.



Fig. 24 Monthly capacity factor & hours of daylight

Fig. 24에서 일조시간 합과 발전량의 추이가 비슷한 패턴으로 움직이지만, 발전시스템이 있는 해발고도와 위치가 종관기상관측 지점과 상이하여 2월과 5월, 8월과 9월에서 차이가 보였다. 엘리트 빌딩 30kW급 태양광 발전시스템의 기상 데이터 중 평균경사일사량(Fig. 25)과 평균수평일사량(Fig. 26)과의 각 발전시스템의 발전량 패턴을 비교하였다.



Fig. 25 Comparison of monthly capacity factor and average slope solar radiation in 2021



Fig. 26 Comparison of monthly capacity factor and average horizontal solar radiation in 2021

Fig. 25에 나타난 바와 같이 고정경사각 타입인 각 태양광 발전시스템의 설비 이용률 패턴이 평균경사일사량과의 패턴과 비슷한 경향성을 볼 수 있고, 특히 경사각이 가장 가파른 엘리트 빌딩 30kW급인 경우 태양의 고도가 상대적으로 낮

은 1월~3월, 10월~12월에 설비이용률의 경향이 다른 발전시스템보다 높게 나옴을 볼 수 있다. 엘리트 빌딩 45kW급인 경우 수평에 가까운 경사각을 가지고 있어 9월과 10월에서의 패턴을 확인하고자 평균수평일사량과 비교한 Fig. 26에서의 경향에서 확인해 볼 수 있다.

엘리트 빌딩의 45kW 태양광 발전시스템이 다른 발전시스템에 비해 설비이용률이 현저히 낮은 것을 볼 수 있는데, 다른 시스템에 비해 설비 노후화가 상당히 진행된 패널이며, Fig. 27에서 볼 수 있듯이 패널이 경사각이 영(zero)이기 때문에 내부 열 순환이 취약한 구조로 만들어져 있어 설비이용률이 상대적으로 낮게 나왔다고 추정할 수 있다.



Fig. 27 Elite Building rooftop 45kW PV System

태양광발전은 주간 시간대에만 가동되며, 일사량이 적은 새벽, 저녁 시간에는 전력 생산이 없다. 이러한 특성으로 설비이용률이 25%를 넘기기 어려우며, 전력 통계 정보시스템(EPSIS : Electric Power Statistics Information System)에 따르면 2021년 제주지역 태양광발전소 이용률은 13.9% 정도이다[27]. 설비이용률은 일조시간과 외기온도에 영향을 받아 봄철이 설비이용률이 가장 높으며, 여름철에는 높은 외기온도로 점차 낮아져 겨울철에는 가장 낮게 측정이 되는 것을 알 수 있다.

4.3.2 피크시간대 태양광발전 이용률 분석

수용가의 전기요금 중 기본요금은 계약용량에 좌우되며, 계약용량은 연간 피크 전력 이상으로 산정하여야 한다. 따라서 태양광발전 설비 도입에 따라 피크전력 감소 가능성을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 자가소비자 입장에서 각 빌딩

의 분산 전원을 활용한 부하관리에 있어 피크시간대에서 태양광설비의 이용률 분석을 통해 피크 감축 가능성을 검토하였다. 피크시간대를 결정하기 위해 2022년 각 빌딩의 전기요금표 데이터 분석을 통해 월별 최대수요전력 추이 현황을 구해 Fig. 28에 나타내었다.



Fig. 28 Monthly maximum power demand of each building

Fig. 28에서 2022년 1월~9월까지 겨울철(1~2월), 여름철(7~8월)에 빌딩의 최대전력수요 패턴이 높게 나오며, 전력 사용이 급증하는 시간대는 한전 파워플래너의 선택기간별 사용량을 확인한 결과를 Table 17에 나타내었다.

Table 17 Peak time zone for each building

구 분	동계		하계	
	2022년 1월	2022년 2월	2022년 7월	2022년 8월
스마트빌딩	11~12시	9~10시	9~10시	9~10시
엘리트빌딩	9~10시	9~10시	16~17시	9~10시
세미양빌딩	10~11시	10~11시	10~11시	14~15시

Table 17의 빌딩별 피크시간대를 기준으로 연중 최고 피크시간대의 태양광발전 이용률과 실효용량을 계산한 결과를 Table 18에 나타내었다. 여기서 실효용량은 해당 월의 동 시간대 발전량의 평균치이다.

Fig. 28에서 연중 최고 피크시간대는 스마트빌딩이 8월 9~10시, 엘리트빌딩이 7월 16~17시, 세미양빌딩이 2월 10~11시이며, Table 18에서 볼 수 있듯이 이용률이 스마트빌딩이 38.8%, 엘리트빌딩 45kW급 22.7%, 30kW급 19.5%, 세미양빌딩은 35.1%로 나타났다.

Table 18 Capacity factor during peak time zone of each building

구 분		동계		하계	
		2022년 1월	2022년 2월	2022년 7월	2022년 8월
스마트빌딩 (75kW)	피크시간대	11~12시	9~10시	9~10시	9~10시
	$CF_{peaktime}$ (%)	28.6	19.4	37.5	38.8
	실효용량(kW)	21.5	14.6	28.2	29.1
엘리트빌딩 45kW	피크시간대	9~10시	9~10시	16~17시	9~10시
	$CF_{peaktime}$ (%)	5.2	10.1	22.7	26.2
	실효용량(kW)	2.3	4.5	10.2	11.8
30kW	$CF_{peaktime}$ (%)	22.9	25.7	19.5	39.9
	실효용량(kW)	6.9	7.7	5.8	12.0
세미양빌딩 (140kW)	피크시간대	10~11시	10~11시	10~11시	14~15시
	$CF_{peaktime}$ (%)	30.5	35.1	49.2	39.3
	실효용량(kW)	42.7	49.1	68.9	55.1

4.4 환경 측면 분석

3.2절(온실가스배출 감축 효과 분석 방법)에서 언급한 지표를 기준으로 Table 19에 제주첨단과학기술단지 내 빌딩 옥상 태양광발전 시스템의 2021년 연간 발전량에 해당하는 온실가스배출 감축 효과를 분석하였다.

Table 19 CO₂ reduction by year

구 분	연간 발전량 (MWh)	온실가스배출 저감 효과 (tonCO ₂ eq.)	소나무 숲 (ha)	식재 효과 (그루)
스마트빌딩(75kW)	90.9	41.8	3.9	299
엘리트빌딩(30kW)	38.8	17.8	1.6	127
엘리트빌딩(45kW)	40.2	18.5	1.7	132
세미양빌딩(140kW)	182.5	83.8	7.8	600

제주첨단과학기술단지 내 3개 빌딩의 2021년 약 352.6 MWh의 전력을 생산하였으며, 이것은 161.9 tonCO₂eq.의 온실가스배출 저감을 의미한다. 이는 우리나라 대표적인 30년생 소나무 숲 15.0 ha가 흡수하는 탄소량이며, 3개 빌딩 연면적을 합친 면적의 약 2배 면적에 달한다. 그리고 연간 소나무 1,159그루의 식재 효과로 볼 수 있다.

Fig. 29은 태양광발전 설비용량 10kW당 온실가스배출 저감 효과와 소나무 식재 효과를 보여주며, Table 20은 발전개시로부터 2022년 9월까지 누적 발전량과 운영기간을 고려한 연간 평균 온실가스배출 저감 효과를 나타낸다.



Fig. 29 Effect of reducing greenhouse gas emissions and planting of pine trees per 10kW of facility capacity

Table 20 CO₂ reduction effect of generation amount of by year

구 분	연간 평균 발전량 (MWh)	온실가스배출 저감 효과 (ton CO ₂ eq.)	소나무 숲 (ha)	식재 효과 (그루)
스마트빌딩(75kW)	88	40	4	289
엘리트빌딩(30kW)	39	18	2	128
엘리트빌딩(45kW)	42	19	2	138
세미양빌딩(140kW)	185	85	8	609

4.5 결과 고찰

자가소비형 태양광발전시스템 운영 분석 방법을 통해 사례 연구 분석을 진행하였다. 연구 결과 요약과 고찰은 아래와 같다.

(1) 2021년 제주첨단과학기술단지 내 빌딩 옥상 태양광 발전시스템의 총발전량은 352,356kWh이다.

(2) 2021년 각 빌딩의 계약 종별, 계시별 요금 체계에 따른 전기요금 절감액은 40,289,767원이다.

(3) 2021년 빌딩별 전기사용량 대비 태양광발전 전기에너지 비율은 세미양빌딩이 약 13%, 엘리트빌딩이 9.2%, 스마트빌딩이 5.7%이었으며, 이에 따른 전기요금 중 전력량요금 절감분 비율은 세미양빌딩이 14.8%, 엘리트빌딩이 10.6%, 스마트빌딩이 6.2%이었다. 태양광발전이 이루어지는 낮 시간대가 전기요금 부하구분기준 변경 전에는 “전력피크타임”으로 변경 후에는 “중간부하시간대”로 지정되어 있기 때문에 발전량 비율보다는 전기요금 절감금액 비율이 더 높게 나왔다.

(4) 누적 발전량에 따른 발전수익으로 초기 투자비용 대비 회수 기간은 스마트빌딩이 15년, 엘리트빌딩(30kW)은 21년, 세미양빌딩은 18년으로 산정된다. 제주지역 전기요금 체계 중 부하시간대 구분기준이 변경되었는데 낮 시간대가 전력피크타임에서 중간부하시간대로 변경되었고, 태양광발전이 낮 시간에 주로 발전이 이루어지는 자가 태양광발전 운영자에게는 불리하게 되었다. 대략 태양광발전을 통한 전력량요금 절감분이 20% 정도 줄었다. 결과적으로 태양광발전에 대한 투

자회수 기간도 길어지는 결과를 낳게 되리라 예상한다.

(5) 2021년 연간 설비이용률에 있어서는 연구대상 태양광발전시스템이 구름이 자주 끼어서 기상 조건이 불리할 수 있는 제주지역 중산간에 위치함에도 불구하고 제주지역 태양광발전소 평균 설비이용률과 비교하였을 엘리트빌딩 45kW급을 제외한 나머지 3개 태양광발전시스템은 약 14% 이상으로 큰 차이가 없음을 보여주었다.

(6) 2022년 각 피크시간대 태양광발전이용률은 스마트빌딩은 8월 9~10시 38.8%, 엘리트빌딩 45kW급은 7월 16~17시 22.7%, 30kW급은 19.5%, 세미양빌딩은 2월 10~11시 35.1%이다. 이 결과를 통해 사무용 빌딩의 경우 태양광발전 시설의 도입을 통해 피크전력을 낮출 수 있는 여지가 충분히 있음을 알 수 있다.

(7) 2021년간 총 온실가스배출 감축 효과는 약 161.9 $tonCO_2eq.$ 이며, 30년생 소나무 숲 15.0 ha가 흡수하는 탄소량이며, 연간 소나무 1,159그루의 식재 효과로 볼 수 있다.

각 태양광발전 모니터링 시스템에서의 데이터 추출 한계와 일괄적인 모듈 센서의 부재, 기상센서값의 불안정한 데이터로 좀 더 세세한 분석이 어려웠다. 이로 인해 일조시간과 설비이용률 데이터를 비교 분석하는데 한계점이 있었다. 최대전력수요 추이 확인에서도 실제 전기요금 청구에서의 최대전력수요 추이와 한전 파워플래너의 선택기간별 최대전력수요 데이터에서도 차이가 발생하는 부분이 있었고 이로 인해 정확한 피크시간대의 태양광발전 이용률 계산에 어려움이 있었다. 향후 건축물에 있어서 에너지자립에 대한 문제점들을 해결하기 위해서는 좀 더 세밀한 분석을 위해 이러한 부분들을 고려하여 하드웨어 및 소프트웨어 개선을 통해 데이터 수집과 분석이 이루어져야 한다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 태양광 발전사업자 측면이 아닌 태양광발전 자가소비자 측면에서 태양광발전 시스템 운영 결과를 분석하는 방법론을 제시하고, 그 적용 사례로 제주첨단과학기술단지 4개 발전시스템의 운영 결과를 분석하였다. 태양광 발전량과 그로 인한 전기요금 절감, 설비이용률, 온실가스배출 저감 효과 및 제주에서 처음으로 시도된 계절별 시간대별 차등요금제 구분 기분 변경이 자가소비형 태양광발전의 경제성에 미치는 영향 등이 조사되었다.

3개 빌딩 옥상의 4개 태양광 발전시스템의 1년간 발전량은 352,356kWh이었으며, 빌딩의 계약 중별, 계절별, 시간별 요금체계에 따른 전기요금 절감액은 40,289,767원이었다. 2021년 9월 1일부터 제주지역 계시별 요금체계의 부하구간 분류 시간대 규정에 변경이 있었으며, 이 변경으로 인해 경제적 측면에서 투자회수기간의 증가 예상되었고, 자가소비형 태양광발전 시스템 도입 사업자에게는 불리하게 규정이 변경되었음을 확인하였다. 연간 설비이용률은 가장 노후화되고 태양광 패널의 경사각이 옥상 지면에 수평인 엘리트빌딩의 태양광발전시스템이 약 9.8%이었으며, 나머지 빌딩의 것들은 평균 14% 정도이었다. 연구 결과로부터 개별 빌딩의 자체 전기에너지 소비 피크시간대에서 높은 태양광발전 이용률이 나타남을 알 수 있었고, 일반적으로 소비전력 피크시간대가 건물의 사용 용도에 따라 다르지만, 이 결과로부터 태양광발전 설비의 도입을 통해 전기에너지 사용에 있어 피크전력, 즉 계약전력을 낮출 수 있는 여지가 있을 것으로 예상된다. 4개 태양광발전 시스템 운영을 통한 2021년 1년간 온실가스 배출 감축 효과는 약 161.9 $tonCO_2eq.$ 이었다.

참 고 문 헌

- [1] 포춘코리아, "2050년까지 홍수와 가뭄으로 5조 6000억 달러 피해" 2022.08.30.
<<http://www.fortunekorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=23482>>
- [2] 기상청 보도자료, "기후변화가 바꾼 우리나라 사계절과 24절기!" 2021.04.27.
- [3] 제주지방기상청, '제주도 기후변화 특성 분석집' 2019.
- [4] 기상청, '신기후체제 대비 제주특별자치도 기후변화 전망 보고서' 2017.12.8.
- [5] Korean Government, '2050 Carbon neutral strategy of the Republic of Korea towards a sustainable and green society', The government of Republic of Korea, Republic of Korea. 2020.
- [6] 환경부 온실가스 종합정보센터, "유엔기후변화협약(UNFCCC)에 따른 제4차 대한민국 격년 갱신보고서" 2021.12
- [7] 탈핵·기후 위기 제주 행동 기자회견문, "에너지 다소비 건물 업체명 공개 기자회견", 2022.02.15.
- [8] 소정훈, 유병규, 황혜미, 유권중, 최주엽, 50kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능모니터링 결과 및 평가분석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 27, No. 2, 2007.
- [9] 현수진, 박세라, 김수완, 성백훈, 이개명, 오성보, 황충구 건물 옥상을 활용한 1MW 태양광발전소의 발전량 분석, 대한전기학회 본부 산하 스마트그리드연구회 추계학술대회 논문집, 2014.12.04.
- [10] 박규호, 오은빈, 이수진, 김수완, 안크호자야, 이개명, 제주지역 대규모 태양광발전소의 전력 판매가격 분석, 조명·전기설비학회 논문지, Vol.31, No.5, 2017.05.
- [11] 심민정, 최대목, 서동준, 대학 캠퍼스 건물의 태양광 발전 시스템 경제성 분석, 한국통신학회 동계종합학술발표회, 2020.
- [12] 김득원, 허재혁, 김민휘, 이동원, 친환경에너지타운 내 850kW급 태양광발전시스템 운영 결과 분석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.41, No.2, pp.25~

- 37, 2021.04.
- [13] 산업통상자원부, 한국에너지공단, “2020 신·재생에너지 백서” 2020.12
- [14] 최병천, 곽왕신, 태양광 발전소 지역별 이용률 분석에 대한 고찰, 한국신·재생에너지학회 추계학술대회논문집, pp. 110~113, 2008.
- [15] 백천현, 정용주, 김영진, 국내 태양광 발전의 용량크레딧 산정을 위한 이용률 기반 근사화 방법, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.37, No.5, pp. 13~26, 2017.10.
- [16] 법제처, 국가법령정보센터, 환경부(기후전략과), “공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침, [별표 7] 외부감축사업 온실가스 감축량 산정 방법론(제24조관련)”
- [17] 국립산림과학원, 이선정, 임종수, 강진택, “주요 산림수종의 표준 탄소흡수량 (ver.1.2)”, NIFoS 산림정책이슈 제129호, 2019.07.01.
- [18] 국립산림과학원, “산림에서의 탄소순흡수량 국가 표준”
- [19] 김익재, RPS제도에서의 태양광 발전사업, 대한전기학회 창립 70주년 기념 하계학술대회 논문집, 2017.07.12.
- [20] 한전 사이버지점, “전기요금제도” <<https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00201.jsp>>
- [21] KEPCO, “전기요금” <https://home.kepco.co.kr/kepco/EB/A/htmlView/EBAHP002_02.do?menuCd=FN430101>
- [22] 산업통상자원부 보도참고자료 “9월부터 제주지역 계절별·시간별 요금제 시 간대 개편안 시행”, 2021.06.25.
- [23] Google Earth, <<https://www.google.co.kr/intl/ko/earth/>>
- [24] 최동진, 태양광 발전시스템에서 모듈 설치 각도와 어레이 간격의 비교 연구, 조명·전기설비학회 논문지, Vol.23, No.1, pp. 162~168, 2009.01.
- [25] 황충구, 이개명, 제주지역에 설치된 1MW 태양광발전소의 발전특성 분석, 대한전기학회논문지, Vol.64, No.5, pp. 726~731, 2015.05.
- [26] 한전 파워플래너 <<https://pp.kepco.co.kr/>>
- [27] 전력통계정보시스템 <<https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/>>
- [28] 관계부처 합동, “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”, 2021.10.18.

감사의 글

일과 병행하며 대학원을 다니면서 많은 것을 깨닫게 해준 지난 3년이 아니었나 생각이 듭니다. 대학원 수업을 듣고 논문을 마무리하기까지 저에게 도움을 주신 많은 분들에게 감사의 말을 전하고자 합니다.

부족한 저를 격려해주시고 용기 북돋아주신 이개명 지도교수님께 깊은 감사의 마음 전합니다. 바쁘신 일정에도 학술대회 준비부터 학위논문 완성까지 세심하게 짚어주시고 열정적인 가르침에 감동받았습니다. 대학원 수업 외에도 개인적인 조언도 아낌없이 주셨던 김호민 교수님, 방향을 잃어버리지 않게 열정적으로 논문 심사 해주신 김세호 교수님, 이개명 교수님, 진영규 교수님, 김호찬 교수님, 최영준 교수님, 송시홍 교수님 감사합니다. 일과 병행하는 동안 학업에 집중하고 포기하지 않게 격려해주신 한국폴리텍 대학교 제주캠퍼스 고성필 교수님, 송석환 교수님께도 감사의 마음 전합니다.

논문 준비한다고 통합방재실 현장관리자로서 임무에 소홀함에도 끝까지 응원 해준 우리 직원 분들에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

학부 졸업 후 이 회사 저 회사 전전공공하다가 2015년 초, 적지 않은 나이에 다시 시작해보자는 생각으로 전기공학 공부를 시작했습니다. 전문기술교육과정을 받으면서 죽어라 전기 자격증 공부에 매달렸던 그해 9월에 좋은 결과를 얻게 되었고, 그 당시 은사님의 말씀이 생각이 납니다. “천천히, 하나씩 차근차근 해 나가다보면 어느 순간 목표에 도달해 있을 거야.”, 그리고 전기기능장을 취득하고, 대학원 공부까지 정신없이 하나씩 앞으로 나가기 위해 노력했던 3년이었습니다. 중간에 ‘포기할까?..이게 과연 나에게 의미가 있는 일일까?..’란 생각에 주저하기도 하고, 당장 목표에 다가갈 순 없어도, 저를 믿어주고, 응원해준 사람들에게 실망감을 줄 수 없어 남편이고, 아빠였기에 힘내자고, 힘내야 된다고 매일같이 되새겼습니다. 항상 제가 어떤 일이든 믿어주고 용기와 희망을 준 내 아내 이순화 씨, 그리고 아들 이지안 너무 사랑하고 그동안 참아주고 지켜봐줘서 고맙고 이 모든 영광을 돌리고 싶습니다.

지금 투석으로 힘드시지만 아직도 아들 걱정만 하시는 아버지, 불편한 몸에도 집안의 힘든 모든 일들을 견뎌내시며 저를 응원해주신 어머니 감사합니다. 학위를 취득하고 앞으로 또 어떤 목표를 가져야 할지는 매일 바뀌겠지만, 큰 방향은 잃어버리지 말아야겠다는 다짐과 반성으로 더 발전 있는 모습 보여주기 위해 노력하겠습니다. 감사합니다.

2022년 12월

이재일 올림