



제로에너지 공동주택을 위한 태양광 발전시스템의 경제성 분석

Economic Analysis of a Photovoltaic System for Zero-energy Multi-residential Houses

윤요선* · 조경주** · 조동우***

Yo-sun Yun* · Kyung-joo Cho** · Dong-Woo Cho***

* Main Author, Department of Living and Built Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (yyun20@kict.re.kr)

** Coauthor, Department of Living and Built Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (kyungjoocho@kict.re.kr)

*** Coauthor, Department of Living and Built Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (dwcho@kict.re.kr)

ABSTRACT

Purpose: Photovoltaic System (PV System) is considered an essential element for zero-energy buildings. In this study, the possibility of zero-energy buildings was examined by installing a PV system in multi-residential buildings. The purpose of this study is to analyze the economic feasibility according to the energy independence rate through the construction cost of the installed PV system. **Method:** The research method is carried out by dividing into 5 stages. 1) Select the target building and set the production amount according to the PV system scale and energy independence rate of multi-residential buildings. 2) Plan to install the PV system on the roof and elevation in consideration of design and productivity. 3) Calculate the PV system installation capacity of the roof and elevation according to the energy independence rate. 4) Calculate the PV system quantity and construction cost for each roof and elevation. 5) Analyze economic feasibility through cost-benefit analysis and payback period analysis of installed the PV system. **Result:** The results of analysis of building floor scale, energy independence and economic feasibility of PV system in multi-residential buildings were synthesized. It was analyzed that within the 25-year recovery period, zero-energy 1st grade level could have 10-story, 2nd grade could have 12-story, and 3rd grade could have 17-story. In addition, in terms of economical efficiency, a 20-story 4th grade level, which has a payback period of less than 14 years with PV system installed on the roof alone, is optimal.

KEYWORD

태양광 발전시스템
제로에너지
공동주택

Photovoltaic System
Zero-Energy
Multi-Residential Houses

ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 4, 2020
Final revision received Dec. 4, 2020
Accepted Dec. 9, 2020

© 2020. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

2020년부터 건축허가를 신청하는 대상 공공건축물은 제로에너지 건축물로 건축하도록 제로에너지 건축물 인증제 의무화가 시작되었다. 제로에너지 건축물 로드맵에 따르면, 2030년까지 연면적 5백㎡ 이상의 민간·공공 건축물은 제로에너지 건축물이 되도록 설계 및 시공되어야 하며, 2025년부터 30세대 이상 공동주택이 의무 대상이 된다[1].

제로에너지 건축물은 건물에 필요한 에너지부하를 최소화하고, 신에너지 및 재생에너지를 활용하여 에너지 소요량을 최소화하는 녹색건축물로 정의하고 있다[2]. 또한 제로에너지 건축물 인증은 녹색건축물을 대상으로 건축물 에너지효율등급 1++ 이상, 에너지 자립률 20% 이상인 경우 자립률에 따라 1~5등급을 부여한다[3]. 현재까지 제로에너지 건축물 인증을 받은 주거용 건축물은 2020년 9월 기준으로 16건이었으며 이중 5건을 제외하고는 모두 5등급을 취득[3]하고 있어 제로에너지 공동주택의 자립률 향상을 위한 적용 시스템 등 관련 연구가 필요하다.

건물 분야에서 이산화탄소 배출을 감소시키기 위한 방법으로 건

축물의 에너지효율개선과 신재생에너지 보급은 중요한 수단이다 [4]. 이 중 신재생에너지 보급은 제로에너지 건축물의 에너지 자립률 획득을 위해 필수적인 요소이다. 신재생에너지 요소로 지열히트 펌프, 연료전지, 태양광 등 다양한 기술이 적용될 수 있는데, 이 중 태양광 발전시스템(이하 PV 시스템)의 경우 신재생에너지원별 에너지 자립률 민감도가 가장 높은 것으로 분석[5]되고 있다. 태양광의 경우 2019년 기준으로 전 세계 태양발전 누적 설치량은 500GW 이상이며, 연간 8% 수준의 높은 성장세를 기록하고 있다[6]. 태양광 발전 산업은 지속적으로 성장하고 있으며, PV 시스템은 기술의 발전으로 인한 효율 향상 가능성으로 볼 때 가장 우선적으로 적용을 검토할 수 있는 기술이다[7].

본 연구에서는 공동주택 건축물에 신재생에너지 요소로 PV 시스템을 설치함으로써, 제로에너지 건축물의 가능성을 살펴보고, PV 시스템 적용 시 공사비 분석을 통하여 어느 정도의 경제성이 있는지를 분석하는 것을 목적으로 한다. 또한 경제성 분석을 통하여 투자회수가 가능한 최적설계를 제안하여 제로에너지 건축물 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

기존 연구에서는 태양광의 적극적인 기술 보급을 위해서는 설비 기술 및 효율성을 고려한 건축 디자인을 고려할 때 파급효과가 크다 [8]고 언급하고 있다. 그러나 제로에너지 등급을 위한 자립률 획득에 급급한 현재 시점에서는 PV 시스템은 디자인 요소로서 고려되지 않고 있는 실정이다. PV 시스템의 효율과 기술이 발전된 만큼 디자

인 적인 부분에 대해 고려되어야 할 필요가 있다.

또한 현재 인허가를 위한 PV 시스템 적용 시 음영부위에 대한 고려는 하지 않고 있어, 실제 사용 시의 전력 생산량은 계산 치와 크게 다를 수 있다. 이에 음영을 고려하여 충분한 일사취득이 가능한 부위에만 PV 시스템을 설치하는 것이 필요하다.

본 논문은 ‘공동주택 단지의 실질 자립률 향상을 위한 태양광 모듈의 프로세스 제안[9]’의 후속 연구로 선행 연구에서 제안한 PV 시스템의 설치비 회수가 가능한 경제적 적산 일사량을 가지는 입면 부위에 태양광 모듈을 설치하는 것으로 PV 모듈의 배치를 제한하였다.

기존 경제성 분석관련 선행연구에서는 경제성 산출시 실제 공사비가 아닌 정부 제시 설치 단가[10] 적용하거나 태양광 보조금[11~13]을 포함하여 공사비를 분석하고, 전력 가격의 경우 판매 가격[13][14]을 적용하여 분석하였다.

본 연구에서는 PV 시스템의 디자인 요소를 설계사무소와 협업을 통하여 제안하고 이를 견적금액에 반영한 후, 실질 전기요금과 공사비 분석을 통해 현실적인 제안이 되도록 하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 선행과제에서 연구한 경제적인 적산일사량을 가지는 공동주택 입면 부위에만 PV 시스템을 적용하고 에너지 자립률을 산정한 후 경제성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 다음과 같은 순서로 연구를 진행하였다.

Step 1 대상건축물 및 목표 생산량 설정

: 공동주택 에너지 자립률에 따른 PV 시스템 목표 생산량 설정

Step 2 공동주택 PV 시스템 적용 계획

: 디자인 및 생산성을 고려한 PV 시스템 설치

Step 3 PV 시스템 설치용량 산정

: 지붕 및 입면 에너지 자립률에 따른 PV 시스템 설치용량 산정

Step 4 공사비 분석

: 지붕 및 입면 PV 시스템 물량 산출 및 공사비 분석

Step 5 경제성 분석

: 지붕 및 입면 설치 PV 시스템의 순현재가치 분석 및 투자회수 기간분석

2. 공동주택 태양광 발전시스템 설치

2.1. 분석 대상 공동주택의 선정

대상 건축물은 선행연구[9]에서 적용한 국민주택규모인 전용면적 84㎡, 공용면적은 110㎡ 단위세대로 이루어진 공동주택으로 설정하였다. 코어가 2개로 이루어진 판상형구조로 층별로 4세대로 구성된 공동주택이다.

지붕과 입면 PV 시스템 설치에 따른 에너지 자립률 변화를 확인하기 위하여 층별로 산출하였으며 층별 규모는 제로에너지가 가능하다고 분석[15]된 10층부터 20층으로 설정하였다(Table 1.).

2.2. 태양광 발전시스템의 목표 생산량 설정

공동주택 단위면적당 1차 에너지소요량은 선행연구에서 산출한

93.3kWh/m²·yr[9]를 기준으로 하였다(Table 2.). 이는 건축물에너지효율등급 1++ 등급 수준이다. 목표전력생산량은 제로에너지 건축물 인증의 에너지 자립률을 기준으로 하였으며 20~100%(5~1등급)까지 생산목표를 설정하였다.

대상건축물의 1차 에너지소요량에 따라 에너지 자립률을 위한 에너지 생산 필요량을 아래 수식(Eq. 1)을 통하여 산출하였다. 20층 규모의 건축물이 에너지 자립률 100%가 되려면 연간 298,560kWh의 전력을 생산해야 한다(Table 1.).

$$Energy\ Requirement\ (kWh/m^2 \cdot yr) = (PEC \times FA \times UN) / CFE \quad (Eq. 1)$$

PEC(kWh/m²) : Primary energy consumption

FA(m²) : Floor area with expansion

UN : The number of units

CFE : Primary energy conversion factor for electric energy

PV 시스템의 설치용량은 지붕과 입면에 최대로 설치할 수 있도록 디자인을 하였고, 이에 따라 설치 가능용량을 산정하였다. 최대로 PV 시스템을 설치하기 위하여 설치면적을 확보할 수 있는 지붕에 우선으로 설치하였으며, 입면의 경우 일사를 많이 받을 수 있는 남향에 음영부위 검토하여 PV 시스템을 설치하였다.

제로에너지건축물 인증 시 1차 에너지소요량 및 자립률 산정을 위해 사용되는 ECO2 프로그램을 활용하여 수평, 수직, 45° 설치 시 및 방위별 단위면적당 발전용량을 산출하였다(Table 3.). PV 시스템의 발전량은 남향의 45°로 설치하였을 때 187kWh/m²·yr로 가장 생산량이 높았다.

Table 1. Target buildings and target energy requirement

Target buildings		Target energy requirement		
Category	Multi-Residential Houses	Energy independence rate	ZEB Grade	Energy Requirement (kWh/m ² ·yr)
Floor	10~20	100%	1	149,280~298,560
Units by floor	4	80%	2	119,424~238,848
Units	40~80	60%	3	89,568~179,136
Private area	84m ²	40%	4	59,712~119,424
Common area	110m ²	20%	5	29,856~59,712

Table 2. Input data of ECO2 program

Items		Value
U-Value (W/m ² ·K)	Wall	0.15
	Window	0.9
	Bottom	0.15
ACH50	-	2.59
Heat Recovery Ventilation Unit	Heat Recovery Efficiency(%)	70%
	Power(W)	50
	Air flow rate(m ³ /h)	150
Heating	Boiler Efficiency	91%
	Fuel Type	Natural Gas
Lighting	-	8W/m ²

Table 3. PV system energy generation by direction

Category		South	East	West
Roof (kWh/m ² ·yr)	Horizontal	169		
	45°	187	153	140
	Vertical	124	101	90
Elevation (kWh/m ² ·yr)	Both side vertical	191		



Fig. 1. BRPV(Bi-directional Reflective Photovoltaic)

2.3 태양광 발전시스템 설치

1) 지붕 양반사형(BRPV)

공동주택의 경우 음영의 영향이 크지 않은 지붕 부위에서 최대의 전력을 생산할 수 있도록 PV 모듈을 배치하는 것이 유리하다. 지붕의 경우 PV 시스템을 최대치로 설치하기 위하여 양반사가 가능한 계단형(BRPV, Bi-directional Reflective Photovoltaic)으로 적용하였다(Fig. 1). 계단형으로 설치할 경우 면적비율을 산출해본 결과 동일 바닥면적에 면적에 45°형을 설치한 것보다 약 22%가 증가하기 때문에 계단 형태를 적용하였다. 또한 기존 문헌[16]에 따르면 계단형 배치의 경우 양반사로 인한 10% 이상의 전력량 상승이 가능하기 때문에 이에 총 생산량에 10%를 가산하여 반영하였다.

대상건축물의 지붕에 BRPV 발전량을 산출하고, 에너지 자립을 위해 추가로 필요한 용량을 산출하였다. 발전량은 방향별 PV 패널의 설치 개수를 산정하고, Table 3.을 적용하여 방향별 발전량을 합하여 산출하였다. 지붕에 배치된 BRPV의 발전량은 연간 134,723kWh로 층별 변화에 따라 지붕 면적은 변화하지 않기 때문에 층수가 늘어나도 발전량은 동일하다. 이에 고층인 20층 규모의 경우 에너지 자립률은 약 45%로 계산되며, 제로에너지 건축물 인증 4등급 수준을 획득할 수 있는 것으로 분석된다. 제로에너지 1~3등급 수준을 위해서는 3등급 44,413kWh/yr, 2등급 10,4125 kWh/yr, 1등급 163,837 kWh/yr를 추가 생산을 필요로 한다.

위와 같은 방법으로 10~20층까지 층별로 목표 자립률 획득을 위해 지붕 이외의 부위에서 생산해야 하는 추가 전력량을 산출하였다. Fig. 2.는 이를 도시한 그래프이며, 0 이상으로 표현된 부분은 등급 달성을 위해 필요한 추가 생산량, 0 이하로 표현된 부분은 등급 달성을 하고 남는 잉여 생산량을 표현하고 있다. 10층 규모의 공동주택의 경우, 지붕에 BRPV를 설치하는 것만으로도 에너지 자립률을 90% 만족시킬 수 있는 수준이다.

BRPV 설치 시 제로에너지 인증등급으로 분석한 결과 10~11층 2등급, 12~15층 3등급, 15~20층 4등급 수준이었다(Fig. 4.). 즉, BRPV를 설치 시 지붕 PV 시스템 설치만으로도 제로에너지 4등급 수준이 달성 가능한 것으로 분석되었다.

2) 입면 양면 수직형(LIPV)

지붕에 PV 시스템을 설치한 것만으로는 에너지 자립률을 100% 만족시킬 수 없기 때문에 루버형태 태양광 모듈(LIPV, Louver Integrated Photovoltaic)을 추가로 설치하여, 상위 등급을 획득하기 위한 요소로 검토하였다.

양면형 태양광 모듈을 루버형태로 동서로 면에 설치할 경우 남향 수직인 형태로 설치하는 것보다 54% 높은 전력을 생산할 수 있다(Table 3.). 또한 LIPV는 전면 시야를 가리지 않아 건축적 활용이 매

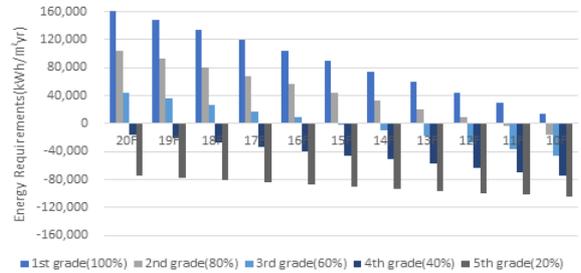


Fig. 2. BRPV energy requirements by energy independence rate



Fig. 3. LIPV (Louver Integrated Photovoltaic)

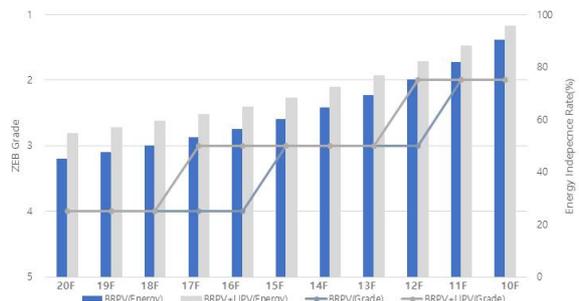


Fig. 4. Energy independence rate and ZEB grade

우 높고, 양면형 태양광 모듈의 경우 프레임 하나로 양면에서 발전이 가능하여 프레임비용이 절약되는 등 경제적[17]이기 때문에 본 연구에서는 LIPV를 공동주택 입면에 적용하였다.

설계사무소에서 제안한 디자인 요소를 반영함과 동시에 음영의 영향을 받지 않도록 Fig. 3.과 같이 배치하였다. 분석대상은 단지가 아닌 단일동이지만 실제 공동주택 단지에서는 인접동이 있는 것을 반영하여 해당 건축물 남측에 12층 규모의 동이 배치된 것으로 가정하였다. 12층은 선행연구[9]에서 통계자료에 의해 최저층으로 제안한 층수이다. 이에 따라 음영의 영향을 최소화 할 수 있도록 음영으로 발전량이 낮은 저층부의 경우 PV 모듈을 설치하지 않고 7층 이상부터 설치하는 것으로 계획하였다. 또한 음영의 영향을 최소화 및 디자인을 고려하여 LIPV를 층별 엇갈리게 설치하였다.

그 결과 입면에 LIPV를 설치 시 전체 에너지 소요량의 약 5~17%를 생산하는 것으로 분석되었다(Fig. 4.). 지붕에 설치된 BRPV와 발전량을 합계한 결과 에너지 자립률 상승에는 약 5~9% 영향을 미치, 제로에너지 건축물 등급에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 분석되

었다. 입면 태양광 추가 설치 시 10~12층 2등급, 13~18층 3등급, 19~20층 4등급 수준으로 분석되었다(Fig. 4.).

3. 태양광 발전시스템 공사비 분석

적용된 PV 시스템의 공사비를 분석하기 위하여, 제로에너지 자립을 별로 적용된 태양광 패널의 물량을 산출하고, 건축공사비, 전기공사비의 내역을 실제 공사업체로부터 견적을 받아 공사비를 산출하였다. 또한 본 연구에서 적용된 BRPV와 LIPV의 스펙은 Table 4.와 같다.

3.1. 지붕 BRPV 적용 공사비 분석

지붕 BRPV의 경우, 태양전지 모듈은 단결정 모듈로 370W 제품을 적용하였고 배치 결과 400장 적용하였다. 태양광 주요 자재, 구조물 공사, 전기공사를 포함하여 견적을 받아 지붕 PV 시스템 설치 시 비용을 산출하였다.

공사비 분석결과 PV 시스템 주요자재의 비용이 약 45%로 가장 높음을 확인할 수 있었다. 지붕 BRPV 설치 공사비는 재료비, 노무비, 경비로 구분하였으며, 부가가치세를 포함한 금액으로 산출하였다. 본 연구에서는 대상 건축물 전체의 공사비에 대하여 산출하지 않고, PV 시스템 설치 시의 추가 공사비에 대하여만 산출하였다.

지붕 BRPV 설치 시 총 추가 공사비는 288,178,000원으로 산출되었으며, 이때 세대 당 추가 공사비의 경우 20층 80세대 동에서는 3,602,225원으로 산출되었다(Table 5.). 태양광 설치 면적은 동일하고 층수의 변화에 따라 세대수가 달라지므로 층수가 낮아질수록 세대 당 공사비는 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5.).

Table 4. Specification of PV modules for experiments

Category	PV module
Rated power (Pmax)(W)	365
Rated current (Imax) (A)	9.18
Rated voltage (Vmax) (V)	39.76
Short circuit current (Isc)(A)	9.72
Open circuit voltage (Voc)(V)	47.72
Efficiency (%)	18.66
Module size (mm)	1972×992
Solar cell type	Aiko Solar
Cell's number (EA)	72

Table 5. Photovoltaic system construction cost

Floor		20F	19F	18F	17F	16F	15F	14F	13F	12F	11F	10F
Energy production (kWh/yr)	BRPV	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723	134,723
	BRPV+LIPV	28,770	26,528	24,660	22,418	20,176	18,308	16,440	14,198	12,330	10,088	8,220
	Sum	163,493	161,251	159,383	157,141	154,899	153,031	151,163	148,921	147,053	144,811	142,943
Energy independence rate (%)	BRPV	45.12	47.50	50.14	53.09	56.41	60.17	64.46	69.42	75.21	82.04	90.25
	BRPV+LIPV	9.64	9.35	9.18	8.83	8.45	8.18	7.87	7.32	6.88	6.14	5.51
	Sum	54.76	56.85	59.32	61.92	64.85	68.34	72.33	76.74	82.09	88.19	95.75
Construction cost (1,000won)	BRPV	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178	288,178
	BRPV+LIPV	283,855	268,774	254,698	239,617	223,646	209,570	194,844	179,775	165,698	157,935	133,945
	Sum	572,033	556,952	542,876	527,795	511,824	497,748	483,022	467,953	453,876	446,113	422,123
Construction cost by unit (1,000won)	BRPV	3,602	3,791	4,002	4,237	4,502	4,802	5,146	5,541	6,003	6,549	7,204
	BRPV+LIPV	3,548	3,536	3,537	3,523	3,494	3,492	3,479	3,457	3,452	3,589	3,348
	Sum	7,150	7,327	7,539	7,760	7,996	8,294	8,625	8,998	9,455	10,138	10,552

3.2 입면 LIPV 적용 공사비 분석

해당동의 층수와 관계없이 지붕면적은 동일하기 때문에 층별 동일하게 설치되어 공사비에 차이가 없지만, 입면 LIPV의 경우 층수에 따라 설치 개수가 달라지기 때문에 적용 층수에 따라 공사비가 달라진다.

입면 LIPV의 경우 370W급 양면형 모듈을 사용하였다. 단 현재 양면형에 대한 성능평가 기준이 부재하여 단면형의 성능과 동일하게 전면 370W급으로 표기된다. 20층 규모의 경우 양면형 77장 적용하였으며, 저층부(1~6층)에는 예칭유리를 적용한 루버를 설치하여 공사비를 산출하였다.

입면 LIPV의 경우 태양광 주요자재, 철근콘크리트공사, 금속공사, 유리공사, 칠공사를 포함하여 견적을 받아 공사비를 산출하였다. LIPV 설치 시 약 54%로 철근콘크리트 공사의 비용이 가장 높음을 확인할 수 있었으며, 다음으로 금속공사의 비율이 높았다. 철근콘크리트 공사비의 경우 Fig. 3.에서 칼라로 돌출된 부분이 추가되어 발생한 비용으로 이 역시 LIPV가 입면과 자연스럽게 어우러지기 위한 디자인 요소의 적용으로 인한 추가 공사비이다.

그 결과 입면 LIPV 설치 시 추가 공사비는 세대 당 3,348,636~3,548,188원으로 산출되었다(Table 5.). 층수가 낮을수록 세대 당 공사비는 낮게 나타났다. 다만 본 연구에서의 디자인은 태양광이 설치되지 않은 디자인 요소 부분에 대한 공사비도 산출되었기 때문에 태양광 설치된 부분에 대해서만 공사비를 산출한다면 입면 태양광 설치비는 더 낮아질 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 태양광 발전시스템 공사비 분석 종합

본 연구에서는 지붕 BRPV의 공사비와 입면 LIPV의 공사비를 구분하여 산출하였다. 지붕 BRPV 설치 시에는 태양광 주요자재의 비

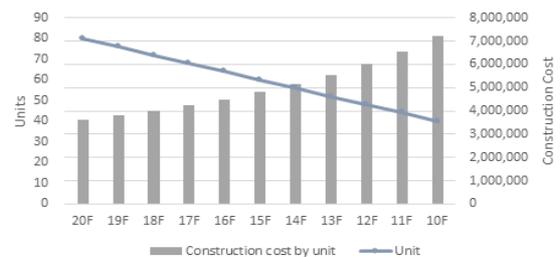


Fig. 5. Additional construction cost by units

Table 6. Photovoltaic system economic analysis

Floor		20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
Construction cost by unit (1,000won)	BRPV	3,602	3,791	4,002	4,237	4,502	4,802	5,146	5,541	6,003	6,549	7,204
	BRPV+LIPV	7,150	7,327	7,539	7,760	7,996	8,294	8,625	8,998	9,455	10,138	10,552
Values (1,000won)	BRPV	261	269	278	288	298	311	325	342	361	384	411
	BRPV+LIPV	293	300	308	318	327	339	352	367	384	404	430
NPV (1,000won)	BRPV	3,873	4,001	4,128	4,272	4,428	4,619	4,825	5,078	5,363	5,697	6,108
	BRPV+LIPV	4,350	4,460	4,571	4,715	4,855	5,030	4,825	5,443	5,697	5,996	6,377
B/C	BRPV	1.08	1.06	1.03	1.01	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.87	0.85
	BRPV+LIPV	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.56	0.60	0.60	0.59	0.60
Payback (year)	BRPV	13.79	14.05	14.38	14.71	15.08	15.42	15.81	16.18	16.60	17.05	17.49
	BRPV+LIPV	24.37	24.36	24.46	24.41	24.42	24.45	24.49	24.52	24.61	25.07	24.54

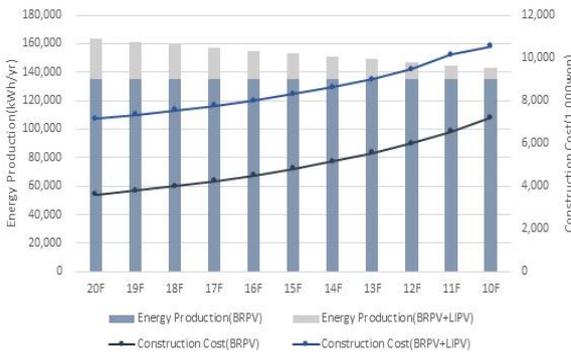


Fig. 6. Energy production and construction cost

용이 높게 나타났으며, 입면 LIPV 설치 시에는 철근콘크리트공사 비용이 가장 높게 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 디자인 요소의 반영으로 인한 비용 상승 부분이다.

입면 LIPV 설치 시 공사비는 층수에 따라 세대 당 공사비가 크게 차이 나지 않았으나, 지붕 BRPV는 동일한 발전량이 다수의 세대에 분할되어야 하는 문제가 있어 층수가 낮아짐에 따라 공사비가 증가하는 것으로 나타났다. 지붕과 입면 모두 설치 시 세대 당 약 715~1,055만원의 추가 공사비가 발생하는 것으로 산출되었다(Table 6.).

에너지 자립률과 공사비를 종합하면, 에너지 자립률이 높아짐에 따라 공사비도 증가하는 것을 분석되었다. 에너지 자립률의 경우 입면 추가 시 5~17% 상승되었으나, 공사비의 경우 31~49% 상승되는 것으로 공사비의 상승 폭이 커서 지붕설치에 비해 경제성이 떨어지는 것으로 분석되었다(Fig. 6.).

4. 태양광 발전시스템 경제성 분석

대상건축물에 설치된 PV 시스템의 경제성을 분석하기 위해 앞서 분석한 BRPV와 LIPV의 설치 용량, 공사비 분석 자료를 활용하였다. 또한 지붕 BRPV 설치에 대한 편익 분석과 지붕과 입면을 동시에 설치했을 경우에 대해 편익을 산출하여 분석하였다.

경제성 분석은 많이 활용하고 있는 순현재가치법(NPV: Net Present Value)으로 편익을 산정하여 비용편익분석(CBA: Cost-Benefit Analysis)을 수행하였다. 순현재가치는 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준년의 현재가치로 환산한 값이며, 비용 편익분석은 추가공사비를 총 편익으로 나눈 것으로 산정결과가 1보다 클 경우 경제성이 있다고 판단한다[18].

4.1 편익 분석

PV 시스템에 따른 편익 분석은 사회적 요소를 고려하지 않고, 매년 발전하는 PV 시스템의 발전에 따른 전기요금에 대한 편익만 고려하여 산출하였다. 전기요금 산출시 상계거래로 가정하여 산출하였다. 세대 전기요금은 주택용 고압요금을 적용하여 산출하였으며, 필수사용 요금이 공제되지 않은 청구금액을 기준으로 적용하였다. 또한 7-8월을 제외한 기타 계절만으로 산출하였으며 한전에서 제공하는 전기요금 엑셀시트를 활용하여 산출하였다[19].

세대 전기사용량은 단지에너지 소요량에 따른 단위세대별 에너지소요량으로 산출한 311kWh를 적용하였다. 태양광 발전시스템의 편익은 아래 수식(Eq. 2)에 따라 세대전기 사용량 요금에서 세대납부 전기요금의 차이로 편익을 산출하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{세대납부 사용량}(C) &= \\
 &\text{세대전기 사용량}(A) - \text{태양광 발전량}(B) \\
 \text{연간편익(원)} &= \text{(Eq. 2)} \\
 &\{\text{세대전기 사용량 요금}(A') - \text{세대납부 사용량} \\
 &\text{요금}(C')\} \times 12
 \end{aligned}$$

4.2 경제성 분석

경제성이 있는 제로에너지 공동주택은 두 가지 의미로 해석될 수 있다. 첫째는 설치 시스템의 내구 연한 내 설치비가 회수되는 경우 경제성이 있다고 볼 수 있으며, 둘째는 최소의 비용으로 제로에너지 인증등급을 획득할 수 있는 경우 경제성이 있다고 할 수 있을 것이다. 이를 분석하기 위하여, 순현재가치 분석과 투자회수기간 분석을 적용하였다.

순현재가치법은 순 현재 가치를 기준으로 수익성을 평가하는 방법으로 화폐의 시간가치를 반영하고 있다. 현재가치를 산출하기 위하여 아래 수식(Eq. 3)에 따라 Table 7.의 조건을 적용하여 산출하였다.

초기 투자비용은 PV 시스템 설치 시 발생하는 공사비로 산출하였으며 보조금은 받지 않은 것으로 산출하였다. 할인율의 산정은 사회적 할인율인 4.5%[18]를 적용하였으며, 평가기간은 태양광 발전시스템의 평균수명인 25년을 적용하였으며, 운영측면에 대한 부분은 고려하지 않고 산출하였다. 편익은 앞서 산출한 연간 편익을 적용하였다.

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{values}{(1+rate)^i} \quad (Eq. 3)$$

NPV : 순현재가치(원)
 n : 사업의 기대수명(year)
 values : 매년 발생하는 편익(원)
 rate : 할인율(%)

경제성 분석결과는 다음과 같다.

(1) 순현재가치 분석결과 지붕만 설치했을 경우 17~20층 규모의 경우 초기 투자비용이 현재가치보다 높고, 비용편익분석에서 1.0이상으로 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

(2) 투자회수기간의 분석의 경우 초기 투자비용에서 편익을 나누어 산출하였다. 지붕만 설치한 경우 13~17년으로 층수가 낮아질수록 회수기간이 증가하였다. 지붕과 입면 모두 설치한 경우 24년으로 규모별 유사하게 회수하는 것으로 분석되었다. 태양광 모듈의 기대수명이 25년으로 지붕과 입면 설치 시 모두 투자회수기간은 25년 내로 가능한 것으로 분석되었다.

4.3 소결

건축물 규모, 에너지 자립률 및 경제성 관점에서 분석 결과를 종합한 결과 Table 8.과 같다. 에너지 자립률을 우선으로 하는 경우 BRPV와 LIPV를 모두 적용함으로써 생산량을 향상시킬 수 있다. 제로에너지 1등급의 경우 10층 규모, 2등급의 경우 12층 규모, 3등급의 경우 17층 규모까지 25년 내에 PV 시스템의 설치비 회수가 가능할 것으로 분석되었다.

또한 경제적인 비용회수 측면에서는 입면 LIPV 설치의 제외하고, 지붕만 BRPV를 설치한 경우가 20층 규모에 4등급 수준의 자립률 달성이 가능하며 14년 이내에 투자비가 회수가 가능한 것으로 분석되었다.

Table 7. NPV analysis

Category	BRPV(20F~10F)	BRPV+LIPV(20F~10F)
Initial cost	3,602,225~7,204,450	7,150,413~10,553,086
Project life	25 year	25 year
Discount rate	4.5%	4.5%
Values	261,240~411,960	293,400~430,080

Table 8. ZEB grade, floor, payback by priority

Priority	PV system	ZEB grade	Floor	Payback (year)
Energy independence rate priority	BRPV+LIPV	1	10	25
	BRPV+LIPV	2	12	25
	BRPV+LIPV	3	17	25
Economic priority	BRPV	4	20	14

5. 결론

본 연구에서는 향후 대상 건축물의 신축허가 시 필연적으로 획득해야 하는 제로에너지 건축물 인증을 위한 자립률 달성 도구로 고효율 PV 시스템을 제안하고, 설치비 회수가 가능한 입면부위에만 PV 모듈을 배치하여 자립률을 달성할 수 있는 가능성을 분석하고자 하였다.

디자인 요소와 이를 반영한 공사비 산정 및 경제성 분석을 통하여 자립률을 우선하는 대안과 최소 자립률로 제로에너지 인증 획득이 가능한 대안을 제시하였으며 그 결과는 아래와 같다.

(1) 에너지 자립률에 따른 목표 생산량을 설정하고 층별 자립 수준을 살펴본 결과 지붕에 BRPV 시스템 설치 시 10~11층 2등급, 12~15층 3등급, 15~20층 4등급 수준을 획득할 수 있을 것으로 분석되었다. 지붕 BRPV와 함께 자립률 향상을 위해 입면에 LIPV 시스템 추가 설치 시 10~12층 2등급, 13~18층 3등급, 19~20층 4등급 수준을 획득할 수 있는 것으로 분석되었다.

(2) 15층~20층 규모의 경우 지붕에 BRPV 시스템 설치만으로도 제로에너지 4등급 수준이 달성이 가능한 것으로 분석되었으며, 10~12층 규모에서는 추가 LIPV 시스템을 설치 시 1등급 수준이 달성 가능할 것으로 분석되었다.

(3) 공사비 분석결과 지붕에 BRPV 설치 시 세대 당 약 360~720만원의 공사비 발생하고, 입면에 LIPV 설치 시 세대 당 약 715~1,055만원의 추가 공사비가 발생하는 것으로 분석되었다.

(4) 경제성 분석결과 지붕에만 BRPV 시스템을 설치한 17~20층 규모의 경우 초기 투자비용이 현재가치 보다 높고, 비용편익분석에서 1.0이상으로 경제성이 있는 것으로 분석되었으며, 지붕 BRPV와 입면 LIPV를 설치한 경우 투자회수기간이 24년으로 태양광 모듈의 기대수명인 25년 내 회수 가능한 것으로 분석되었다.

(5) 건축물 규모, 에너지 자립률 및 경제성 관점에서 분석 결과를 종합한 결과, 제로에너지 1등급의 경우 10층 규모, 2등급의 경우 12층 규모, 3등급의 경우 17층 규모까지 25년 내에 PV 시스템의 설치비 회수가 가능할 것으로 분석되었다. 또한 비용회수 측면에서는 입면 LIPV 설치의 제외하고, 지붕만 BRPV를 설치한 경우가 20층 규모에 4등급 수준의 자립률 달성이 가능하며 14년 이내에 투자비가 회수되어 최적이라고 판단된다.

다만 본 연구에서는 신재생에너지 요소 중 가장 경제성이 있는 것으로 기 연구되어진 PV 시스템 설치에 대한 부분만 고려하여 분석하여 운영단계 측면은 포함하지 못한 한계가 있다. 향후 기후에 따라 발전량이 다를 수 있는 PV 시스템 외에도 제로에너지 건축물을 위한 추가적인 기술적 요소 및 운영단계를 고려한 경제성 분석 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This study is a part of the research result conducted with research fund supporting in 2020 of Ministry of Science and ICT.

The Project code : 20200037-001 (Active Technology Development for IoT based Smart Zero Energy Buildings)

[19] 한국전력공사, “주택용 전력(고압) 전기요금표”, <http://cyber.kepco.co.kr>, 2020.10.03. // (KEPCO, "Residential power (high voltage) electrical Rates", <http://cyber.kepco.co.kr>, 2020.10.03.)

Reference

[1] 국토교통부, 제2차 녹색건축물 기본계획(2020-2024), 2019. // (MOLIT, The 2nd Green Building Basic Plan(2020-2024), 2019.)

[2] 국토교통부, 녹색건축물조성지침. // (MOLIT, Green Building Act.)

[3] 제로에너지빌딩 인증시스템, “인증제도 안내, 인증제도 현황”, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC00/BC00_01_001.do, 2020.09.24. // (Zero-energy Building Certification System, “Certification Information and status”, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC00/BC00_01_001.do, 2020.09.24.)

[4] 한국에너지공단, 2020년도 KEA 에너지 편람, 2020. // (Korea Energy Agency, 2020 KEA Energy Hand Book, 2020.)

[5] 한국에너지공단, 제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서, 2020. // (Korea Energy Agency, Zero Energy Building Certification Technical Element Reference, 2020.)

[6] 한국수출입은행, 2020년 1분기 태양광 산업동향, 2020. // (The Export-Import Bank of Korea, PV Industry Trend in 2020 Quaterly Report, 2020.)

[7] 정창현, PV시스템 적용 공동주택의 에너지 제로화를 위한 적정 건축규모 검토, 한국건축환경설비학회 제11권 제2호, 2017, pp.113-120. // (Cheong, C.H., Appropriate Size of a Net Zero-Energy Multi-Family Housing using PV system, Journal of KIAEBS 11(2), 2017, pp.113-120.)

[8] 강승훈, 윤상현, 제로에너지하우스에 적용 가능한 신재생에너지 기술, 한국설비기술협회 설비/공조·냉동·위생 제32권 제2호, 2015, pp.61-70. // (Kang, S.H., Yun, S.H., New and Renewable Energy Technology Applicable to Zero-energy House, Journal of the KARSE 32(2), 2015, pp.61-70.)

[9] 조경주, 조동우, 공동주택 단지의 실질 자립률 향상을 위한 태양광 모듈의 배치 프로세스 제안, 생태환경건축학회 제20권 제4호, 2020, pp.83-88 // (Cho, K.J., Cho, D.W., Installation Process Proposal of Apartment PV Modules for Improving Real Energy Self-Sufficiency, KIEAE Journal, 20(4), 2020, pp.83-88)

[10] 김진형, 공동주택 태양광발전 시스템의 경제성 평가, 한국기후변화학회지 제1권 제2호, 2010, pp.163-177. // (Kim, J.H., Economic Analysis on a PV System in an Apartment Complex, Journal of Climate Change Research 1(2), 2010, pp.163-177.)

[11] 김광원, 서윤규, 홍원화, 태양광발전시스템이 적용된 그린홈의 경제성 평가에 관한 연구, 대한건축학회, 제30권 제5호, 2014, pp.221-218. // (Kim, K.W., Seo, Y.K., Hong, W.H., A Study on the Economic Evaluation of Green Home Applied Photovoltaic System, Journal of AIK 30(5), 2014, pp.221-218.)

[12] 정순성, 그린홈 적용 태양광 발전시스템의 편익비용분석에 관한 연구, 한국동력기계공학회지 제18권 제3호, 2014, pp.112-117. // (Jung, S.S., A Study on the Benefit-Cost Analysis of Photovoltaic System in the Greenhome, Journal of KSPSE 18(3), 2014, pp.112-117.)

[13] 강성민 외 4인, RETScreen 기반 유희공간 태양광 발전시스템의 경제성 평가 연구, 한국기후변화학회 제8권 제1호, 2017, pp.21-30. // (Kang, S.M., et al., Journal of Climate Change Research 8(1), 2017, pp.21-30.)

[14] 이태호, 반영운, 공동주택 태양광발전설비 타당성 검토, 대한민국토·도시계획학회 추계정기학술대회, 2007, pp.1539-1547. // (Lee, T.H., Ban, Y.W., Feasibility Analysis of Photovoltaic Array System for Apartment Housing, KPA Conference Proceeding, 2007, pp.1539-1547.)

[15] Cho, S.W., Kim, J.J., Zero Energy Potential of High-Rise Residential Buildings. JAABE, 14(3), 2015, pp.641-648.

[16] 한국건설기술연구원, IoT 기반 스마트 제로에너지건물 액티브 융합기술 개발, 2019, pp.15-21. // (KICT, Active Technology Development for IoT based Smart Zero Energy Buildings, 2019, pp.15-21.)

[17] 조경주, 조동우, 루버일체형 양면형 태양광 모듈의 건축적 활용을 위한 발전성능 평가, 생태환경건축학회 제20권 5호, 2020, pp.129-134. // (Cho, K.J., Cho, D.W., Evaluation of Power Generation Performance for Architectural Applications of Louver-integrated Bifacial Solar Modules, KIEAE Journal, 20(5), 2020, pp.129-134.)

[18] 공공투자관리센터, 공기업 준정부기관 사업 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침, 2018, pp.188-191. // (Korea Development Institute, Guidelines for conducting preliminary feasibility studies for public enterprises and quasi-governmental organizations, 2018, pp.188-191.)