

한국 산업용 건물지붕 적용 PV에 의한 발전량 및 CO₂ 분석연구

김지수*, 이응직**, 황정하***

*세명대학교 대학원 건설공학과(hi-jisu@nate.com), **세명대학교 건축학과(drlee@semyung.ac.kr),
***경북대학교 건축도시환경공학부(peter@knu.ac.kr)

A Study on Electric Capacity and CO₂ by the Roof Top PV System of the Industrial Building in Korea

Kim, Ji-Su* Lee, Eung-Jik** Hwang, Jung-Ha***

*Dept. of Architecture, Graduate School, Semyung University(hi-jisu@nate.com),
**Dept. of Architecture, Semyung University(drlee@semyung.ac.kr),
***School of Architectural Eng., Kyungpook University(peter@knu.ac.kr)

Abstract

The purpose of this study is to provide foundational data for expansion of solar generation in building application, a clean energy, by introducing applicability of solar power generation system on roofs of industrial buildings and computing expected amounts of power and carbon dioxides reduction. As methodologies of this study, after reviewing 120,000 domestic factories to verify the BIPV feasibility for industrial buildings through theoretical considerations of solar generation system, we calculated BIPV application methods and subsequent expected power generation quantity and carbon dioxide reductions through roof type analysis.

We analyzed four cases of expected power generation amounts of solar batteries according to application methods, and when considering that the main type of roofs are slant roofs according to the investigation result about roof forms of domestic industrial complexes, we believe that the module angle of a slant roof around 17°(case 3) is most suitable for the application.

Finally, we came up with 517,944 [TOE] as the corresponding petroleum tonnage based on this computed expected power generation amount and the amount of 1,214,836 [tCO₂] carbon dioxide reductions by calculating them by energy sources.

Keywords : BIPV 시스템(BIPV system), 태양광발전(Solar power generation), 산업용 건물(Industrial building), 지붕형태(Roof system)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

전 세계는 지금 새로운 에너지원의 개발과 더불어 온실가스 감축을 위한 대체 에너지 개발 경쟁의 소리없는 전쟁을 치르고 있다. 주요 국가들은 이산화탄소 감축 계획을 발표한 뒤 태양광을 비롯한 여러 신재생에너지 분야의 빠른 상업화를 위해 천문학적인 자금을 투자하고 있다.

이러한 국제적 추세와 국가의 발전방향을 고려하여 화석연료 사용을 감소하고 환경오염 우려가 적은 신·재생에너지 기술이 차세대 국가 산업의 핵심 분야로 대두되고 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

그 중에서도 태양광발전(Photovoltaic, PV)은 친환경 신재생에너지의 대표적인 분야로 무한한 태양에너지원을 바탕으로 간단한 시스템 구조와 높은 안전성, 20~30년에 달하는 긴 수명을 가지고 있으며 1MW당 27.3명의 고용을 창출할 수 있는 일자리의 보고이기도 하다.¹⁾

태양광발전은 무한한 에너지원으로서 청정 에너지라는 장점을 가지고 있으나 많은 양의 에너지를 생산하기 위해서는 넓은 면적이 필요하게 된다. 이는 국토의 가용 면적이 점차 제한되는 상황에서 향후 PV발전시설을 위한 부지 확보가 쉽지 않은 점에 비추어 제약적 요소라 할 수 있다.

한편 지식경제부에서는 2007년 12월 산업단지 내에 공장 연면적의 3분의 1로만 설치가 가능했던 태양광발전 시설을 모든 공장건물 옥상에 설치 할 수 있도록 허용하여 기존의 넓은 공장지붕을 좀 더 유용하게 에너지 생산 기지로 활용하자는 의미로 해석된다.

이를 통해 청정 태양광에너지 이용을 활성화 시키고 국토를 합리적으로 이용할 수 있는

장점이 있을 뿐만 아니라 전력소비가 큰 소비처가 곧 생산처라는 동일입장에서 에너지 공급의 효율적인 시스템 구축 면에서도 바람직할 것이다.

이에 본 논문은 산업용 건물의 지붕에 태양광발전 시스템의 적용 가능성을 검토하고 그에 따른 단위면적당 예상발전량을 추산했다. 그 결과를 토대로 공장용 건물에 PV시스템이 적용 가능성을 검증하여 청정에너지인 태양광발전의 건축물 적용 보급 확대와 저탄소 사회 조성을 위한 기초자료를 마련하는데 있다.

1.2 연구방법 및 범위

본 논문의 연구는 국내·외 문헌 및 인터넷 검색, 현장방문에서 얻어진 PV시스템 적용에 관한 이론적 고찰을 토대로 국내 산업단지의 지붕형태를 분석하고, 이 분석된 자료를 통해 국내 산업용 건물의 적용 가능성과 그 효과를 분석하는 것으로 진행하였다. PV시스템이라는 성격은 관점에 따라 다양하게 접근 가능할 것이나, 본 논문의 연구범위는 건축적 성격 안에서 산업용 지붕에 태양광발전 적용 가능성과 그에 따른 예상발전량의 추산하여 가장 효율적인 적용 형태를 제시하는 것을 연구 범위로 한정한다. 이를 위하여 한국산업단지공단의 공장설립 관리 정보시스템(FEMIS)에 등록된 약 12만개의 공장의 면적과 지붕형태에 따라 적용 가능한 형태의 태양광발전을 통해 연간 생산되는 예상발전량을 도출하였다.

2. PV시스템의 필요성 및 기능

PV시스템은 다른 신재생에너지에 비해 넓은 설치 면적이 필수적으로 필요하게 된다. 하지만 우리나라의 경우 산악적 지형으로 인하여 국토 유효면적 비율이 매우 낮아 별도의 PV설치용 나대지 확보에 상당한 제약이 따른다. 이러한 관점에서 산업단지 내에 공장 연면적의 3분의 1로만 설치가 가능했던 태양

1) 한국일보 2010.04.15

광발전 시설을 모든 공장건물 옥상에 설치 할 수 있도록 허용하는 시행법의 완화는 기존의 활용하지 않은 지붕의 면적을 활성화하자는 의미로 해석된다고 할 수 있다. 원칙적으로 PV모듈의 기본조건은 건축 외장재의 요구 조건과 건축적인 요소, 디자인 요소, 구조적 요소를 잘 소화할 수 있어야 한다.²⁾

표 1. PV모듈의 건축적 요구 성능

구 분	요 구 성 능
기후에 대한 성능	내후성, 내습성, 단열성, 기밀성 등
건축 구조적 성능	부착의 안정성, 외부 충격에 대한 내구성, 내화성, 보수용 용이성
거주자의 요구조건에 대한 성능	실내·외의 접촉 연계성. 공간의 확보성, 채광 및 차양조절의 기능성, 실내의 쾌적성 등
건물 내부 보호 성능	외부의 소음 차단, 오염공기로부터 보호, 오존 및 자외선 차단, 유해 곤충의 차단 등

아울러 PV의 통합에 있어서 반드시 염두에 두어야 할 사항은 어떠한 정형화된 틀에서 이루어지는 것이 아니라는 점을 이해하는 것이다. 건물의 형태 및 용도 등에 따라 모듈의 위치와 모듈 디자인, 부착방법들이 다양하게 시도될 수 있기 때문이다. 이러한 관점에서 보면 산업용 건물에도 건물일체형(BIPV) 형태가 충분히 가능하며 또 바람직하다. 국내 현실상 BIPV 범위를 확대하여 부가적 형태의 상황도 고려대상으로 포함된다고 할 수 있다.

3. 국내 산업용 건물 분석

3.1 산업용 건물 현황

한국 산업단지 공단에서 운영하고 있는 공장설립관리정보시스템(FEMIS)에 등록 완료된 공장들은 약 12만개에 달한다. 하지만 지붕면적만 종합한 통계적 수치 자료가 전무한 관계로 공장

2) 이웅직, "지붕일체형 PV모듈의 건축특성 및 적용사례 분석연구", 한국생태환경건축학회 논문집, v.6 n.3(통권 21호), 2006.9, pp.49-56

의 건축면적을 가지고 정량적 수치를 추산하였다. 건축면적은 제조시설 (197,341,000m²)과 부대시설 (85,517,000m²)의 면적을 합한 것으로 그 면적은 282,858,000m²이며 <표 2>의 내용과 같다.

표 2. 제조/ 부대시설 건축면적 합계표
단위 : 1000m²

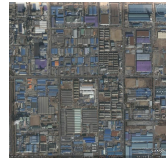
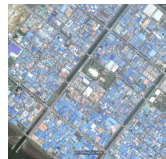
제조/부대시설		제조시설	부대시설
합계		197,341	85,517
개별	소계	89,904	40,203
	일반	83,685	37,639
	창업	6,218	2,564
계획	소계	107,437	45,314
	국가	54,156	24,090
	지방	39,182	15,036
	농공	11,096	5,784
	자유	1,736	84,000
	외국인	1,267	320



출처 : 한국산업단지공단 공장설립관리정보시스템(FEMIS), 2010.06 기준

3.2 산업용 지붕 형태 분석

국가 산업단지 중에서 비교적 규모가 큰 일부 단지를 대상으로 위성사진을 통한 건물 지붕형태만을 분석하였으며, 그 특징은 아래의 <표 3>과 같다.

표 3. 산업단지의 지붕 형태 및 특징

산업 단지	특 징
	- 구미국가 산업단지 - 조성면적 : 21,876,000m ² - 분양면적 : 14,904,000m ² - 규칙적인 배열, 박공지붕, 솥을 지붕, 평지붕 형태가 비슷한 비율로 분포 되어 있음
	- 시화국가 산업단지 - 조성면적 : 16,568,000m ² - 분양면적 : 12,207,000m ² - 규칙적인 배열, 대부분 박공지붕이며 일부 솥을지붕 형태를 띠고 있음, 지붕의 향은 남서·북동향과 남동·북서향으로 되어 있음

	<ul style="list-style-type: none"> - 반월국가 산업단지 - 조성면적 : 15,374,000m² - 분양면적 : 8,307,000m² - 규칙적인 배열, 대부분 박공지붕 형태를 띠고 있으며 지붕 향은 남·북향과 동·서향, 남동·북서향, 남서·북동향으로 복합적으로 되어 있음
	<ul style="list-style-type: none"> - 창원국가 산업단지 - 조성면적 : 25,302,000m² - 분양면적 : 18,898,000m² - 규칙적인 배열, 대부분 박공지붕 형태를 띠고 있으며 지붕의 향은 남서·북동향과 남동·북서향으로 되어 있음


국내의 대표적인 산업단지를 분석한 결과, 공장 지붕 형태의 대부분이 박공지붕으로 구성되어 있으며 일부 솟을지붕 및 평지붕의 형태를 가지고 있었다. 지붕의 방향은 국내 산업단지 대부분이 남향위주의 형태를 보이고 있으며, 남향이 여의치 못한 지역이 동·서향 및 북·동, 북·서향의 형태를 가지고 있으며, 건축면적은 약 282,858,000m²에 달한다. 건물의 위치, 방향, 돌출부 등을 고려하게 되면 전체 면적에 전부 설치 할 수 없기 때문에 본 논문에서는 총면적의 10%정도의 최소 설치면적 수준으로 임의적 가정을 하였다. 그에 따른 예상 PV설치 면적은 28,285,800m²이며, 발전량은 약 2,828,580kW로 추산이 가능하다.³⁾

3.3 대 면적 지붕적용사례 분석

대구컨벤션센터의 지붕형태는 동·서쪽이 올라간 굴곡진 평지붕 형태를 띠고 있고 금속지붕 마감재에 덧대기 방식으로 영문글씨로 설치 되어있다. 대구컨벤션센터의 지붕형태는 동·서쪽이 올라간 굴곡진 평지붕 형태를 띠고 있고 금속지붕 마감재에 덧대기 방식으로 영문글씨로 설치 되어있다.

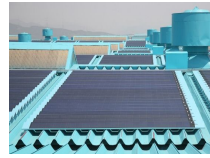
3) 이계형의 2명, “태양전지 원론” 홍릉과학출판사 (태양전지의 변환효율을 10%로 가정할 때 쾌청한 날에 지표면에 도달하는 태양광이 단위면적당 1 kW/m²의 에너지를 제공하므로 1m²면적의 태양전지는 100W의 전기를 출력할 수 있는 것)

표 4. 대구 전시컨벤션센터 지붕 적용사례

EXCO(대구 전시컨벤션센터)	
	<ul style="list-style-type: none"> • 위치 : 대구광역시 • 설치년도 : 2006년 • 발전규모 : 222kWp • 태양전지 : 단결정형 • 적용기법 : 덧대기 방식 • 연간발전량 : 256,000kWh

연간 발전량은 256,000kWh로 석유절감효과는 연간 55,04 TOE, 석탄절감효과는 연간 13,386.2kg/y, CO₂ 억제효과는 연간 49,197kg/y⁴⁾에 달하며, 이 효과들은 전반적인 평균 효율임을 명시한다.

표 5. 포스코 광양제철소 지붕 적용사례

포스코 광양제철소	
	<ul style="list-style-type: none"> • 위치 : 전라남도 광양시 • 설치년도 : 2003년 • 발전규모 : 1MWp • 설치면적 : 30,000m² • 모듈타입 : 박막형 • 적용기법 : 덧붙이기 • 연간발전량 : 2,500MWh

광양제철소의 지붕형태는 박공지붕의 형태를 띠고 있으며, 모듈은 지붕의 경사면을 이용하여 덧대기로 적용시킨 형태이다. 연간발전량은 2,500MWh에 달하며, 연간 16억원의 전력매수익과 함께 약 1천 600t의 온실가스를 감축하는 효과를 거둘 것으로 기대하고 있다.⁵⁾

4. 지붕용 BIPV의 적용방법과 효율

지붕용 BIPV 시스템은 PV 모듈과 달리 지붕에 부착하거나 자재화 시켜 지붕 경사도를 그대로 이용해 다른 BIPV 시스템에 비해 발전효율이 높은 편이며 임의적으로 다른 구조체를 사용하지 않고 설치가 가능하다는 장점이 있다.





4) EXCO 태양광발전시스템, <http://sola.excodeaegu.co.kr/page/4.asp>

5) 경남일보, 2008

기존의 산업용 건물에 적용 방법은 현실적으로 덧대기 방식과 덧붙이기 방식으로 적용 가능하며, 신축 산업용 건물경우는 초기설계 시 부터 PV 시스템의 적용성을 검토하고 주변의 입지와 지붕의 향을 잘 고려하여 건물일체화 방식의 적용이 계획되어야 한다.

현재 국내 산업용 지붕면적의 통계자료 확보는 원활치 않기 때문에 공장의 건축면적의 수평 투영 면적만을 가지고 산출하였다. 그것을 감안한 산업용 건물의 지붕에 적용 방법은 <표 6>와 같이 구분 할 수 있다. 이에 대하여 수평 투영면적 1m² (1m×1m) 크기의 단위면적을 기준으로 삼았고, 일사효율은 1982년에서 1994년까지 일사량 통계를 가지고 산출한 것으로 특정 지역 위도에서의 효율이 아닌 한국의 전반적인 평균 효율임을 명시한다.

표 6. BIPV 시스템의 적용 방법 및 발전효율

구분	적용 방법	모듈 면적 ⁶⁾	일사효율 ⁷⁾ (남향 기준)
평지붕 지붕면 이용(0°) (기준모델)		1m ²	약 80%
평지붕, 경사지붕 (동·서향) 프레임 이용(30°)		0.565m ⁸⁾	약 100%
경사지붕 경사면을 이용 (최소물매: 3/10, 17°)		1.044m ⁹⁾	약 90%
경사지붕 경사면을 이용 (최소물매: 3/10, 17°)		0.872m ²	약 100%

6) 수평 투영 면적 1m²를 기준으로 간섭 및 음영을 고려한 실제 설치 가능한 모듈 면적을 말함.

7) Eung-Jik Lee, "Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten von Photovoltaik an Gebäuden in Südkorea". 1999. 5, Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur Universität Dortmund

8) 모듈을 경사 30°로 설치 할 경우, 동지 때 태양고도 30°에 의한 음영발생 부분을 제외한 1m²내에 설치 가능한 모듈 면적을 말함.

5. 지붕 형태별 발전량 비교분석

산업용 건물 지붕의 형태는 앞에서 언급했듯이 박공지붕, 솟을지붕, 평지붕 형태가 대다수를 차지한 예상발전량을 도출하기 위해서는 지붕의 면적을 알아야 하지만 현재 산업 단지를 분석·통계 자료에는 지붕에 대한 면적은 확인이 어려우며 산업단지공단에서 운영하는 공장설립정보관리시스템의 자료에서 공장의 건축면적만 확인이 가능했다. 따라서 지붕 면적을 알 수 없기 때문에 건축면적에 준한 환산으로 발전량을 도출하고자 하여 <표 7>를 기준으로 지붕 형태별 단위면적 발전량을 도출하는 방법을 선택하였다.





발전량 산출에 있어서 일사량은 국내의 주요 지역의 평균 일사량인 3079kal/m².day를 사용하였으며, 손실률은 PV패널 설치 시 간격에 따라 냉각에 의한 손실이 발생하므로 그에 따른 손실률을 감안해야 한다.

케이블 및 인버터 등의 효율이 100%가 될 수 없기 때문에 PCS부분의 효율비를 적용시켜야 하며, 태양전지의 설치시 덧대기 형식의 경우, 전지와 전지 사이의 음영에 대한 이격거리로 인해서 발생하는 공간에 따른 손실률 또한 적용하여야 한다.

아래의 <표 7>의 CASE 1~4의 태양전지 종류에 따른 단위면적당 발전량 중 다결정형의 경우를 살펴보면 예상발전량은 <CASE 4>가 가장 좋았으며 <CASE 2>가 가장 낮게 나타났다. 하지만 <CASE 4>의 경우는 기울어진 경사면에 부가적인 구조체를 설치하고 그 위에 모듈을 설치해야하는 등의 시공의 어려움이 있기 때문에 그보다는 발전량에서는 조금 떨어지지만 현장 시공성이 높고 부가적인 경비의 측면에서도 절약이 가능한 <CASE 3>의 경우가 국내 산업단지 지붕에 가장 적합한 형태라 판단된다.

9) 경사도가 17°인 경사지붕의 경우 직접 설치 가능하기 때문에 음영에 대한 고려가 불필요함. 따라서 모듈설치 면적이 수평 투영 면적 1m²보다 넓음.

표 7. 단위면적당 적용방식에 따른 태양전지의 예상발전량

구 분	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
지붕형태	평지붕	평지붕	경사지붕	경사지붕
적용기법	덧붙이기	덧대기	덧붙이기	덧대기
적용형태				
모듈 설치 경사각도	0°	30°	약17° (최소물매)	30°
설치 가능 모듈면적 ¹	1m ²	0.565m ²	1.044m ²	0.872m ²
각도에 따른 일사효율 ²	약 80%	약 100%	약 90%	약 100%
간격에 따른 손실률 ³	15%	없음	15%	없음
PCS 효율	약 90%			
태양전지면적/ 모듈총면적 ⁴	80%			

태양전지 종류에 따른 단위면적당 발전량⁵

단결정형 (효율:16%)	0.274kWh/day	0.228kWh/day	0.322kWh/day	0.352kWh/day
다결정형 (효율:12%)	0.210kWh/day	0.175kWh/day	0.247kWh/day	0.269kWh/day
박막형 ⁶ (효율:8%)	0.161kWh/day	0.114kWh/day	0.189kWh/day	0.176kWh/day

참고)1. 설치가능 모듈면적은 건축면적(수평)에서 단위면적당 태양전지 모듈의 설치 가능한 면적

- 태양전지 설치각도가 30°일 때 효율 100%로 기준
- 간격에 따른 모듈 발전 손실률 참고(2008대구 그린에너지엑스포)
- Pilkington Solar 팜플렛, 1997
- 박막형 태양전지는 온도에 상승에 따른 발전효율의 감소가 낮기 때문에 간격에 따른 손실률을 배제하였음
- 발전량[kWh/day] = 일사량[kcal/m²·day] × 설치모듈면적[m²] × 손실률 × 0.8(최대설치면적 80%) × 모듈각도에 따른 효율[%] × 태양전지 효율[%] × PCS 효율[%] ÷ 860(1kWh=860kcal)

* 일사량의 경우 국내 주요지역 월별 일 일평균 수평면 전일사량 3079kcal/m²/day을 기준으로 산출¹⁰⁾

6. 결 론

국내 산업단지의 지붕형태 분석을 통해 PV 적용방법과 그에 따른 예상발전량을 산출한 자료로부터 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 한국의 산업용 건물은 대부분 박공지붕 형태를 나타내고 있으며 평지붕과 솟을지붕 형태도 비중 있게 차지하고 있다. 지붕의 향은 산업단지에 따라 다소 다르지만 일반적으로 동·서향, 남·북향, 남동·북서향,

남서·북동향 등 복합적으로 나타난다.

- 국내 평균 일사량과 적용방법에 따른 건축 면적의 단위면적당 일일 예상발전량을 산출한 결과 다결정형의 경우 물매가 10분의 3(최소물매)인 약 17°의 경사지붕에서 모듈을 수평면에서 30°로 설치된 방법의 발전량이 가장 높을 것이라는 추산할 수 있었다.
- 산업용 건물 지붕에 PV를 설치하기 위해서는 지붕의 형태와 지붕재료의 종류, 돌출부에 의한 음영을 잘 고려해야 한다. 위의 조건에 부합되는 산업용 지붕의 대표적인 형태는 <표 6>의 적용형태들과 같으며, 국내 산업용 건물의 경우 남·북향 경사지붕 <표7의 CASE 3>의 적용형태가 적합하다고 판단된다.

태양광발전은 전력을 발전하기 위해선 넓은 면적이 필요로 하게 된다. 그래서 산업용 건물의 지붕에 PV를 적용시킨다면 적절한 활용이라 판단된다. 이를 위해서는 BIPV 모듈의 개발과 적용 기술을 꾸준히 연구되어야 하고, 대량생산에 의한 비용의 절감이 함께 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 이웅직, “지붕일체형 PV모듈의 건축특성 및 적용사례 분석연구”, 한국생태환경건축학회 논문집, v.6 n.3(통권 21호), 2006.9, pp.49-56
- Eung-Jik Lee, “Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten von Photovoltaik an Gebäuden in Südkorea”. 1999. 5, Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur Universität Dortmund
- 이재형외 2명, “태양전지 원론” 홍릉과학출판사
- 태양열에너지 기술개발 현황 및 전망, 설비기술 2006.10 pp82-92
- Planning and Installing Photovoltaic Systems: A guide for installers, architects and engineers, JAMES & JAMES. 2005.

10) 태양열에너지 기술개발 현황 및 전망, 설비기술 2006.10 pp82-92