

초고층 시스템거푸집 공사의 태양광에너지 활용 방안 연구

Photovoltaic Application in System Formwork Operations of High-rise Building Construction

김 태 훈¹ 이 명 도¹ 이 응 균² 조 훈 희^{3*} 강 경 인³

Kim, Taehoon¹ Lee, Myungdo¹ Lee, Ung-Kyun² Cho, Hunhee^{3*} Kang, Kyung-In³
*Graduate School, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 136-713, Korea*¹

*School of Civil and Environmental Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, OK, 74078, U.S.A.*²

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 136-713, Korea*³

Abstract

Recently, eco-friendly energy has been employed in diverse fields of industry in order to reduce environmental pollution and secure a new growth engine. In particular, practical applications of photovoltaic energy, such as building integrated photovoltaic systems, have been implemented to the construction industry based on the extensive interest in photovoltaic power as an unlimited and sustainable energy. While the construction of a high-rise building requires large amounts of energy, methods of reducing energy consumption in the construction phase have rarely been studied. Based on this motivation, the research proposes a photovoltaic based formwork system (PVFS), and then performs a design and feasibility analysis for its application to the construction of a high-rise building. Using a case study, the research implements various analyses, including area, position, and total allowable weight required by PVFS, and evaluates the influences of PVFS on the construction processes, as well as its economic feasibility. The proposed PVFS can be adopted to a real-world project in the near future, depending on the advancement of technology and economic feasibility. The results of this research will contribute to establishing a construction environment that promotes a reduction of energy consumption by using eco-friendly energy in the construction phase.

Keywords : Eco-friendly Energy, High-rise Building, Construction Phase, Photovoltaic Based Formwork System (PVFS), Feasibility Analysis

1. 서 론

1.1 연구의 목적

국내의 과다 에너지 소비형 산업구조와 높은 에너지 해외 의존도는 심각한 환경문제를 야기할 뿐 아니라 경제성장을 저해하는 요소로 작용하고 있으며, 이에 친환경 에너지를 활용한 새로운 성장 동력의 확보가 절실하게 요구된다. 특히, 건물의 에너지 소비량은 총 에너지 소비량의 25% 이상

을 차지하고 있으며, 이로 인해 건축분야의 에너지 절감은 전체 에너지 절감율을 크게 향상시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있다[1].

이와 같은 배경으로 건축물에 친환경 에너지를 활용하기 위한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며, 특히 설치장소의 제약이 없고, 청정하며 무한한 태양에너지를 통한 태양광 발전(Photovoltaic; PV) 산업에 관심이 집중되고 있다. 최근에는 건축물의 전력 수급과 더불어 외피 마감 재료로 활용할 수 있는 건물통합형 태양광발전(Building Integrated Photovoltaic; BIPV)에 대한 최적 설계[2,3,4] 및 성능평가 [5,6] 등에 대한 연구와 사례적용이 활발히 이루어지고 있다.

하지만, 최근 건축물의 초고층화 추세를 감안할 때 BIPV와 같은 건물 완공 이후 뿐 아니라 시공 단계에서의 태양광 에너지 활용방안에 대한 연구가 요구된다. 이는 일반 건물

Received : January 19, 2011

Revision received : April 5, 2011

Accepted : April 5, 2011

* Corresponding author : Cho, Hunhee

[Tel: 82-2-3290-3328, E-mail: hhcho@korea.ac.kr]

©2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

에 비해 규모가 대형화됨에 따라 건물 완공 후 뿐 아니라 시공 단계에서의 에너지 소비도 이에 비례하여 증가하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 초고층 건축물 공사의 시공 단계에서 태양광에너지의 활용 방안으로 자동인양 거푸집 공사 전력공급을 위한 PV시스템 설계 및 이의 적용타당성 분석을 수행함으로써, 시공단계의 친환경 에너지 활용에 대한 가능성을 모색하고 에너지소비 절감을 위한 새로운 건축 환경 구축에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 초고층 공사 시공 단계에서의 태양광 에너지 활용방안을 모색하고, 이의 적용가능성을 평가하는 것을 연구의 범위로 한다. 이를 위하여 기존 연구 및 문헌 조사를 통해 PV시스템의 동작원리와 구성요소, 성능 영향 요소, 설계 절차에 대해 고찰한 후, 초고층 건축물 시공 단계에서 태양광 에너지 적용 대안을 모색하였다.

현장 조사 및 전문가 면담을 통해 태양전지 면적 확보와 전력 대체 가능성이 높은 대안으로 거푸집 시스템의 전력공급을 선정하고, 이를 구축하기 위한 설계 절차 및 검토사항을 도출하였다. 이를 바탕으로 사례연구(Case-study)를 통해 PV시스템의 설계와 시스템 설치면적위치 확보 및 거푸집 허용하중 초과여부, 공정영향 및 경제성 검토를 통한 현장 적용 타당성 분석을 수행함으로써 초고층 시공 단계에서의 친환경 에너지 활용 가능성을 모색하였다.

2. PV시스템 고찰

2.1 태양광 발전의 동작 원리

태양의 빛에너지를 전기 생산에 이용하는 태양광 발전은 햇빛에너지를 직류 전기에너지로 변환하는 태양전지와 태양전지로부터의 직류전력을 교류전력으로 변환하는 전력변환 및 제어기술로 정의할 수 있다.

태양광발전은 일반적으로 실리콘(Si)으로 대표되는 반도체 소자인 태양전지(Solar cell)를 이용하는데, 이 태양전지는 폴리실리콘(Poly-silicon)을 주요 소재로 하여 잉곳(Ingot)과 웨이퍼(Wafer)의 제조를 거쳐 생산하게 된다. 태양전지는 서로 전기적 성질이 다른 N형의 반도체와 P형의 반도체를 접합시킨 구조를 하고 있으며, 이러한 태양전지에

태양광선이 닿으면 광기전력효과(PV effect)에 의하여 기전력을 발생시키고 이를 직류로 변환시키는 것이다.

2.2 태양전지 종류 및 특징

태양빛의 에너지를 전기에너지로 바꾸는 것이 태양전지이다. 현재, 태양광 발전 시스템으로 일반적으로 사용하고 있는 것은 실리콘 반도체가 대부분이다. 특히 결정계 실리콘 반도체의 단결정 및 다결정 태양전지는 변환 효율이 좋고 신뢰성이 높아서 널리 사용하고 있다.

일반적으로 태양전지는 에너지 전환 효율과 제조비용에 따라 Table 1[7]과 같이 3세대로 구별된다. 결정형 태양전지를 1세대, 화합물 반도체 및 박막형 반도체 태양전지를 2세대, 그리고 유기 및 나노 반도체를 이용한 3세대로 분류한다. 현재 결정형 태양전지는 2세대 박막형 및 3세대 태양전지보다 높은 모듈 효율을 내고 있지만 높은 공정비용과 향후 추가적인 비용절감의 어려움을 지닌다. 따라서 에너지 회수기간이 상대적으로 짧고 대면적화가 용이하여 저가격화 가능성이 큰 차세대 박막형 태양전지 기술 개발에 관심이 집중되고 있다[7]. 또한, 3세대인 유기물 태양전지는 생산단가가 매우 저렴하나 아직 초기 단계 기술로 모듈 효율과 신뢰성이 부족한 상태이다.

Table 1. Classification of solar cells by generation

	Category	Market share(%)	Module efficiency(%)
1 st generation	Single crystal Si	42	15
	Poly crystal Si	43	12
2 nd generation	III-V	Below 0.1	35
	Thin-film Si	12	8
	CdTe	2.7	10
	CIGS	0.2	12
	Dyes	Below 0.1	7
3 rd generation	Organic	Below 0.1	Below 5
	Nano	-	-

2.3 PV시스템 분류 및 구성

태양전지를 이용한 태양광 발전 시스템은 크게 독립형과 계통 연계형으로 분류된다. 계통 연계형 태양광시스템은 계통선이 공급되는 지역에서 태양전지를 이용하여 주간에 생성된 전력을 인버터(Inverter)를 통해 변환하고, 상용 전원 계통과 연결하여 전력을 공급하거나 또는 일부하중에 직접

전력을 전달하게 된다. 반면 독립형은 계통선이 없이 단독으로 또는 보조발전기와 병행하여 사용되는 시스템으로, 태양전지모듈에서 생산된 전력을 조절하고 안정적으로 축전되게 하는 전력조절장치, 전기를 저장하는 축전지, 축전지의 직류전기를 유압모터에 사용할 수 있도록 교류전기로 변환하는 인버터 등이 있으며, 현재 전력조절장치는 인버터의 기능에 포함되어있다.

2.4 PV시스템의 성능 영향 요소

태양광 에너지는 지표면에 최대 $1\text{kw}/\text{m}^2$ 정도의 낮은 에너지 밀도를 가지고 있으며, 이를 활용한 PV시스템의 에너지 생산량은 일사량과 태양전지 모듈의 변환 효율에 크게 좌우되게 된다. 일사량은 지리적 위치와 계절, 태양전지의 설치 경사각과 향에 따라 변화되며, 기존 연구 조사 결과 정남향으로 $30\sim 45^\circ$ 경사각에서 일사량이 가장 크게 되는 것으로 나타났다[8].

이외에 시스템의 설치형태, 오염물질이나 기타 다른 요소에 의해 태양전지 모듈 표면에 발생하는 음영과 모듈의 온도 상승은 효율 저하를 야기하게 되므로, 이러한 요소의 제거 및 완화 방안이 고려되어야 한다.

2.5 PV시스템 설계절차

PV시스템의 설계는 일반적으로 Figure 1과 같이 PV시스템을 설치할 대상과 용도를 상정한 후 부하량을 산정한다 [9,10]. 이를 토대로 시스템의 형식과 구성기기를 결정한 후, 설치장소 및 방식을 선정한다.

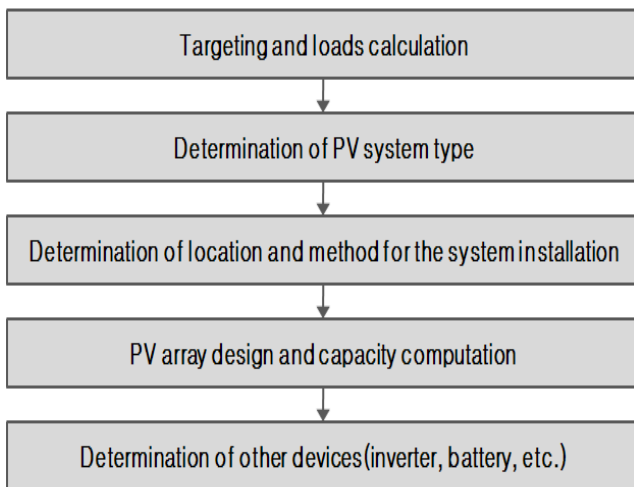


Figure 1. Design procedure of PV system

이와 같이 기본적인 시스템 선정이 이루어진 후, 식 (1)과 같이 부하량과 일사량을 토대로 태양전지 어레이(array)의 출력을 산정하며, 산출된 태양전지 어레이의 출력에 따라 태양전지 모듈의 개수와 설치면적을 산출한다.

$$P_{AS} = \frac{E_L \times D \times R}{(H_A / G_S) \times K} \quad (1)$$

여기서,

- P_{AS} : 표준상태에서 태양전지 어레이 출력(kW)
(표준상태: AM1.5, 일사강도 $1,000\text{W}/\text{m}^2$, 태양전지 셀 온도 25°C)
- H_A : 어느 기간에 얻을 수 있는 어레이 표면 일사량 ($\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{기간}$)
- G_S : 표준상태에서의 일사량(kW/m^2)
- E_L : 일평균 부하 전력량(kWh)
- D : 부하의 태양광발전시스템에 대한 의존율
= $1 - (\text{백업 전원전력의 의존율})$
- R : 설계여유계수(추정 일사량의 정확성 등의 설치환경에 따른 보정)
- K : 종합설계계수(태양전지 모듈출력의 불균일의 보정, 회로 손실, 기기에 의한 손실)

마지막으로, PV시스템의 형식에 따라 축전지, 인버터 등 기타설비의 용량과 설치장소를 결정한다. 축전지 용량 Q_B 는 아래 식 (2)와 같이 산정되며, 인버터의 용량은 부하의 정격용량을 토대로 산정된다.

$$Q_B = \frac{E_L \times (1 + N)}{B_F} \quad (2)$$

여기서,

- Q_B : 축전지 소요 용량(kWh)
- E_L : 일평균 부하 전력량(kWh)
- N : 부조일수(발전되지 않는 날, 통상 3~5일)
- B_F : 축전지 상수(방심전도 \times 보수율)
- 방심전도 : 빛이 없는 날의 최종일에 축전지 용량의 65%까지 방전하도록 설계를 할 때는 65%설계, 통상 0.65
- 보수율 : 축전지 사용년수의 경과나 사용조건의 변동 등에 의한 용량 변화를 보상하는 보정값, 통상 0.85를 기준으로 적용

3. PV의 초고층 시공단계 적용방안 도출

3.1 PV의 초고층 시공단계 적용을 위한 대안 모색

초고층 건물은 일반 건물 공사에 비해 전체 공사 기간이 길고, 현장 규모가 대형화, 복잡화됨에 따라 시공 단계에서 막대한 양의 에너지가 소비되므로, 전체 공정에 사용되는 에너지를 태양광 에너지로 대체하기 위해서는 넓은 태양전지 모듈의 설치 면적을 필요로 한다. 하지만 시공 과정에서는 이러한 면적의 확보가 어렵고 현재 10~15%에 불과한 태양전지의 효율을 고려하였을 때, 전문가 면담 결과 일부 공정에 활용하는 방안을 모색하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

건축물 완공 후가 아닌 시공단계에서 태양전지를 이용한 전기에너지를 얻기 위해서는 일정 공사기간동안 태양전지를 설치할 수 있는 상시면적이 요구된다. 이러한 조건의 충족이 가능한 요소를 현장조사를 통해 검토한 결과 타워크레인이나 호이스트와 같은 양중장비, 가설난간, 거푸집의 3가지 대안을 도출하였다. 아래 Table 2는 PV를 시공단계에서 적용시킬 수 있는 대안과 전력 활용 방안, 현장 조사 및 전문가 면담을 통한 검토 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Review of alternatives for PV system application

Alternatives	Use	Review results
Lifting equipment	Power supply for equipment operation	- Necessity of electricity over 26kW - Insufficiency of required area for PV module installation
Safety handrail	Power supply for temporary substructures	- Unsafe degree of temporary structure - Changeability of installation area - Possibility of wide shade
System formwork	Power supply of hydraulic motor	- Advantage over obtaining incident angle by placement on the uppermost story - Uniform installation area - Intermittent operation

우선 호이스트, 타워크레인에 대한 면적과 필요전력을 검토한 결과 중장비의 특성 상 26kW 이상의 상시전력을 필요로 하며, 이 전력을 확보할 호이스트나 타워크레인의 태양전지 부착면적이 부족하여 적용 가능성이 없는 것으로 나타났다.

또한, 시공 과정 중 가설 난간에 부착하여 가설전기를 공급하는 방안은 일정 면적이 확보되지 못하며 축소되는 건축

물의 최상층이 아니므로 음영요소로 인한 장애가 가장 클 것으로 예상되었다.

거푸집의 경우, 초고층 공사의 외벽 거푸집으로 일반적으로 사용되는 자동 인양 거푸집의 유압 모터 전력 공급에 대한 검토를 수행하였다. 그 결과 시스템 거푸집이 최상층에 위치하여 태양광 에너지 입사각 확보에 유리하며, 일정한 면적확보가 가능하고 상시 전력 공급이 요구되지 않는다는 점에서 PV시스템의 활용 가능성이 높은 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 PV시스템을 초고층 건물 외주부의 자동 인양 거푸집에 전력공급원으로 적용한 PV기반 거푸집 시스템(Photovoltaic based Formwork System; PVFS)을 제안하고, 이의 적용가능성 검토를 수행하였다.

3.2 PVFS 구축 방안 및 검토사항

초고층 공사에 사용되는 자동 인양 거푸집은 일반적으로 Figure 2(a)[11]와 같이 크게 3단의 작업발판과 상승을 위한 클라이밍 레일 및 부속 자재들로 구성된다. 또한 이의 인양을 위한 유압 실린더(Figure 2(b)[11])는 클라이밍 레일에 부착되며, 유압 실린더의 구동은 Figure 2(c)[11]와 같은 유압 펌프를 통해 이루어진다. 이 때 유압 펌프는 하부의 유압 모터에 의해 구동된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 PVFS는 자동인양 거푸집의 인양을 위해 사용되는 유압모터의 전력원을 태양광 에너지로 대체하는 것으로, 상용계통선의 연계 없이 태양전지판으로 발전된 태양에너지만을 통해 구동할 수 있게한 독립형 PV시스템으로 구축한다.

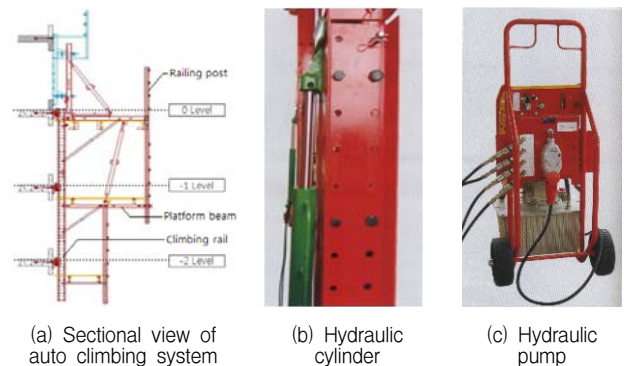


Figure 2. Illustration of auto climbing system

우선, PVFS를 구축하기 위해서는 거푸집과 태양전지 모듈의 부착 위치 및 방식 선정이 필요하다. 이를 위해 자동인

양 거푸집에 대한 상세한 설명 후 국내 PV시스템 생산판매 업체 전문가와의 인터뷰를 통한 검토를 수행하였으며, 그 결과 거푸집 발판 내부와 갱폼 측면 부위는 거푸집 설치해체·인양 시 작업공간으로 공사지연 및 파손 가능성이 클 뿐 아니라 상부 발판에 따른 일사량 확보가 어려워 태양전지 모듈의 설치가 부적합한 것으로 나타났다. 반면, 거푸집 발판 외부의 보호 난간대는 벽체 거푸집 설치와 가설 작업을 위한 3개 층의 공간이 확보가 되어 태양전지 모듈의 부착 면적을 확보할 수 있을 뿐 아니라 거푸집에 의한 음영이 발생하지 않는다. 또한 모듈 후면이 개방에 의해 환기, 배기가 이루어져 온도 강하로 인한 발전성능 상승효과를 기대할 수 있어[12], 태양전지 모듈의 부착위치로 적합한 것으로 판단되었다. 부착 방식의 경우 앞 절에서 언급되었듯이 최대한의 일사량을 획득하기 위해서는 30°~45° 정도의 경사각으로 태양전지를 설치하는 것이 필요하므로, 거푸집 보호 난간대의 수직면에서 태양전지 모듈의 경사각을 확보하기 위한 가설부재의 설치를 통해 가능한 것으로 나타났다.

다음으로 거푸집 외부 보호 난간대에 설치될 태양전지 어레이의 출력은 식(1)에 따라 산정 가능하며, 이에 따라 부착될 태양전지 모듈의 개수와 설치면적이 산출된다. 또한 상기에서 언급하였듯이 독립형 PV시스템으로 구축하기 위하여, 태양전지의 직류전기를 교류전기로 변환하기 위한 인버터와 한 층의 골조공사 작업이 이루어진 후 다음 층으로 인양하기까지의 기간 동안 발생하는 전기를 저장하기 위한 축전지가 요구된다. 축전지의 용량은 식(2)에 따라 산정되며, 인버터는 부하인 유압모터의 정격용량을 토대로 산정된다.

이와 같이 산출된 용량을 바탕으로 각 설비를 설치하고 현장에 적용하기 위해서는 건물 방위, 거푸집 1개 유닛과 태양전지 모듈의 길이에 따른 태양전지 어레이 배치 및 음영발생 가능성, 전체 시스템의 중량에 따른 거푸집 허용 하중 초과 여부가 검토되어야 한다. 또한, 완공된 건물이 아닌 공사 중인 현장의 건물 외부 거푸집에 적용되는 점을 고려하여 PV시스템 설치, 운영, 해체에 따른 공정지연 발생 가능성에 대한 검토가 요구되며, 최종적으로 시스템 설치·유지관리 비용과 발생 편익에 따른 경제적 타당성이 검토되어야 한다.

4. Case-study를 통한 PVFS 설계 및 타당성 분석

4.1 Case-study 현장 개요

PVFS의 현장 적용가능성을 평가하기 위하여 실제 자동인양 거푸집을 사용하여 시공한 초고층 현장을 case-study 현장으로 선정하였다. 사례 현장은 국내 P건설회사의 아파트 건설현장으로 현재 마감공사가 진행 중에 있으며, 현장 개요 및 자동인양 거푸집 적용사항은 Table 3과 같다. 이 중 Figure 3(a)의 입면을 가지는 지하 2층, 지상 53층 규모의 건물 1동에 대하여 PVFS를 설계하고, 이의 적용 타당성 검토를 수행하였다.

Table 3. Descriptions of case-study project and facade formwork

Category	Descriptions	
Project name	OOO apartment project	
Address	Hagik-dong, Nam-gu, Incheon, Korea	
Number of buildings	4	
Number of stories	B2F ~ 53F	
Structural type	Reinforced concrete structure	
Cycle time	4 ~ 5(days)	
Floor height	3.1(m)	
Model name	RCS	
Facade form work system	Allowable load	5(ton/cylinder)
	Lifting speed	0.5(m/min.)
	Capacity of hydraulic motor	3.7(kW) / 3-phase 380(V)
Number of units	28(units)	

적용된 RCS(Rail Climbing System) 모델은 기존의 자동인양 거푸집(Auto Climbing System; ACS)에 비해 경량이며, 레일과 발판이 동시에 인양 가능하여 인양속도가 향상됨으로써 최근 적용이 증가하고 있다. 사례 현장의 층고는 3.1m로 RCS는 일반적으로 2개의 유닛이 동시에 인양되며, 1분당 0.5m씩 상승이 가능하므로 2개 유닛 인양에 필요한 유압 모터의 가동시간은 약 7분 정도가 소요된다. 사례현장의 골조공사는 Figure 3(b)와 같이 공정상 2개 구역(Zone)으로 구획되어 진행되었다.

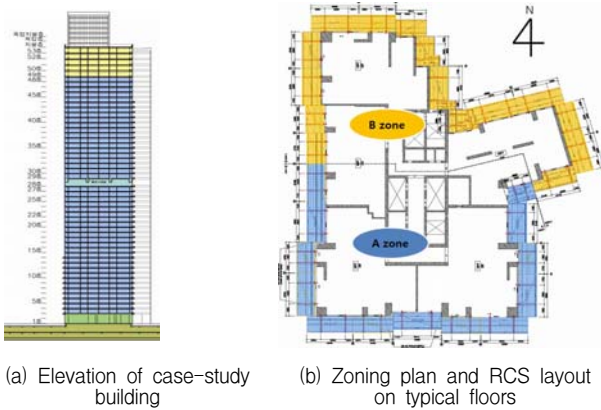


Figure 3. Elevation and Rail Climbing System (RCS) layout of case-study building

4.2 PVFS 설계

4.2.1 유압모터 전력수요량 산정

자동인양 거푸집의 유압모터의 전력수요량을 산정하기 위한 사례 현장의 RCS 거푸집 설계 개요는 Table 4와 같다. 사례현장의 골조공사는 실 작업일수(Working day) 기준으로 4~5일의 층당공기로 진행되었으며, A zone과 B zone 이 2일의 사이클(Cycle) 차이로 공사가 수행되었다. 따라서 휴일 등의 비 작업일수를 고려하였을 때 대부분의 층에서 축전 가능일수는 증가될 것이나, 본 연구에서는 최단기간인 4일 공기에 맞추어 PVFS의 설계를 수행하였다.

Table 4. RCS application on case-study building

	A zone			B zone				Total
	East	West	South	East	West	South	North	
Number of Units	4	4	5	4	4	1	6	28
Area (m ²)	91.6	88.3	101.1	96.5	80	21.5	111.4	590.4

앞에서 언급되었듯이 2개 유닛이 동시에 인양되는데 소요되는 시간은 약 7분이며, A, B zone은 각각 13개, 15개 유닛으로 구성되어, 유압모터는 각각 7회, 8회 구동된다. 따라서 유압모터가 2일 간격으로 구동되므로 충전일수를 고려하여 일평균 부하소비 전력량은 Table 5와 같이 산출된다.

Table 5. Capacity computation of RCS hydraulic motor

Category	Calculation	Results
A zone	3.7(kW)×[7(min.)÷60(min.)]×7(times)	3.02(kWh)
B zone	3.7(kW)×[7(min.)÷60(min.)]×8(times)	3.45(kWh)
Daily average power consumption	[3.02(kWh)+3.45(kWh)]÷4(days)×2(days)	3.23(kWh)

4.2.2 태양전지어레이 용량 및 설치 매수 산정

PV시스템의 태양전지는 수 십매의 태양전지 셀을 일정한 틀에 고정하여 구성된 태양전지 모듈과, 부하설비 전력량에 의해 필요한 발전전력을 얻기 위한 모듈의 결합인 태양전지 어레이로 구성된다.

태양전지 어레이의 출력량은 식 (1)에 의해 산정되며, 각 변수의 값은 다음과 같다. 일평균 부하소비 전력량 E_L 은 Table 5의 3.23kWh이며, D는 외부전력의 유입을 고려하는 것으로서 본 시스템은 순수한 태양전지로의 구동으로 설계하였으므로 1을 적용하였다. 또한 설계여유계수 R은 일반적인 적용 수치인 1.2를 적용하였으며, H_A/G_S 는 서울경기 지역 45도 설치각도의 일사량인 3.6kWh를 적용하였다. 또한 종합설계지수 K는 직류보정계수 K_d , 온도보정계수 K_t , 인버터효율 η_{INV} 등으로 나누어지며, 일반적 적용 수치인 0.5를 적용하였다. 이에 따라 부하 전력량에 의해 요구되는 발전전력을 얻기 위한 태양전지 어레이의 출력량은 2.15kWp으로 산정된다.

Table 6. Electrical characteristics of applied PV module

Category	Descriptions
Rated capacity(W_p)	200W
Rated voltage(V_{mp})	26.81V
Open circuit voltage(V_{oc})	33.1V
Size(mm)	1459×979×40
Weight(kg)	17.2

상기에서 도출된 태양전지 어레이 출력량을 바탕으로 태양전지 모듈의 매수를 결정한다. 태양전지는 어레이 출력량 및 설치 면적을 고려해, 국내 S 태양전지 생산업체의 정격 용량 200W의 인증제품 모델을 선정하였으며, Table 6은 선정된 태양전지모듈의 표준상태에서의 전기적 특성이다.

필요한 태양전지 모듈의 매수는 태양전지 어레이출력량을

정격용량으로 나누어 산출되며, 총 11매가 필요한 것으로 나타났다.

4.2.3 축전지 및 인버터 용량산정

PVFS는 독립형 태양광 발전설비로서 주간에 발전된 전력이 축전지에 저장되고, 거푸집 인양시 필요한 유압모터의 에너지가 축전지로부터 방출된다. 축전지 용량은 식 (2)에 의해 산출된다(Table 7).

Table 7. Capacity and number of batteries, and inverter capacity

Category	Calculation	Results
Battery capacity	$\frac{3.23 \times (1+3)}{0.65 \times 0.85}$	23.4(kWh)
Required number of battery	$\frac{23.4kWh \times 1000}{12V \times 100AH}$	19.5 ≈ 20(units)
Inverter capacity	3.7kW×5	18.5(kW)

일평균 부하전력량 E_L 은 Table 5에서 산출된 것과 같이 3.23kWh이며, 부조일수 N은 적용현장의 유압모터가 2일 간격으로 사용되므로 안전율을 고려하여 3일로 계상하였다. 또한, 방심전도와 보수율은 각각 일반적 설계치인 0.65와 0.85를 적용하였다. Table 7에서 산출된 축전지 용량에 따라 축전지 대수를 산정하며, 공칭전압 12V-100AH 축전지를 사용할 경우 20대의 축전지가 요구된다.

거푸집 인양용 유압모터는 3상 380V의 교류전력을 사용하므로, 인버터를 통해 태양전지의 직류전력을 교류전력으로 변환하게 된다. 인버터의 용량은 유압모터의 정격용량에 모터의 초기 구동을 위한 부하기동전력을 고려해 5배수로 산정되어, 정격 출력용량 20kW, 정격출력전압 380V 사양으로 선정된다(Table 7).

4.3 PVFS 적용 타당성 분석

4.3.1 태양전지 설치 면적 및 위치

태양전지의 생산전력량은 국내 일사량 분포에 따라 최적 경사각 24°~36°에서 3.5~4.5kWh/m²day로 나타나며, 남향 33° 경사에서 가장 높은 효율을 가진다. 하지만, PVFS의 경우 거푸집 외벽면 가설강관에 설치되므로 설치의 용이성과 구조적 안정성 확보를 위해 거푸집 외벽면 45° 각도로

설치하도록 한다.

Figure 4에 보여지듯이, 대상 건물의 A zone 남향의 경우 거푸집 1unit당 길이는 5.4~6.8m로 설치될 태양전지 모듈의 총 매수가 11매이고 장변의 길이가 약 1.5m임을 감안할 때, 거푸집 1unit당 2~3매씩 1열로 배치 할 수 있으며, 태양전지 어레이의 이격간격은 고려하지 않아도 된다. 또한 작업량 및 작업자의 동선, 케이블 등 PV시스템 설비의 간섭을 고려하였을 때 Level 0과 -1발판 사이의 공간이 가장 적합한 설치 장소로 판단된다.

위의 결과를 바탕으로, 태양전지 어레이는 A zone 남향 Level 0과 -1발판 사이에 거푸집 수직면 45° 각도로 1열 배치 가능할 것으로 사료된다. Figure 4는 사례현장에 대한 PVFS의 설치 개념도이다.

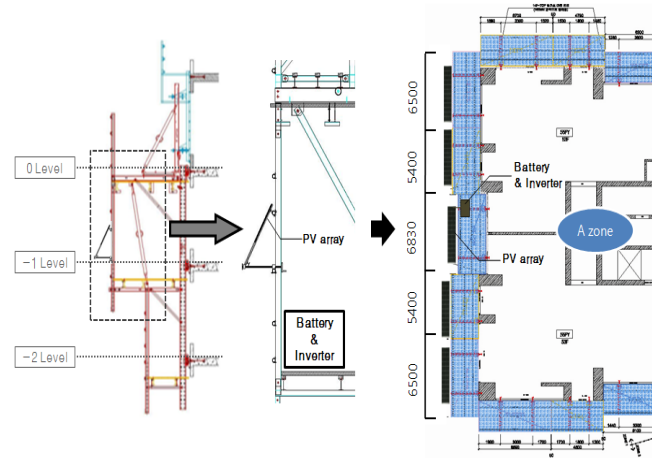


Figure 4. PVFS installation plan

4.3.2 PVFS 중량 및 거푸집 허용하중

PVFS는 거푸집 외부면 및 발판에 설치되므로 PVFS의 총 중량을 산정하여 거푸집 1개 유닛에 적재하였을 때 거푸집 허용하중을 초과하지 않는지에 대한 검토가 필요하다. PVFS의 중량 산정을 위하여 거푸집 1개 유닛에 태양전지 모듈 총 11매 중 3매를 설치하는 것으로 가정하였으며, 케이블 동선 최소화를 위하여 축전지와 인버터는 거푸집 1개 유닛에 일괄 적재하는 것으로 하였다. 가설대는 태양전지 어레이의 후면에 부착되어 태양전지 모듈을 구조적으로 고정하기 위한 것으로, 일반적으로 사용되는 C형강으로 중량을 산정하였다(Table 8).

Table 8. PVFS weight computation

Elements	Size(mm)	Calculation	Subtotal (ton)
PV module	1459×979×40	17.2kg×3pieces	0.051
Battery	330×171×217	25.6kg×20units	0.512
Inverter	600×900×500	185kg×1unit	0.185
Linking device (Channel)	100×50×20×3.2	[(1.459m×2pieces×3units)+(0.979m×4units)]×5.5kg/m	0.069
Others	Sub-linking device, cable, etc.		0.05
Total weight of PVFS			0.867

현장에 설치된 자동인양 거푸집 1unit은 5ton의 하중을 부담하는 실린더가 2개 장착되어 총 10ton의 허용하중을 가지며, RCS 주자재, 토류관, 거더, 강관 등의 RCS 발판 하중과 갱폼 하중을 포함하여 4~6ton의 하중을 부담하게 된다. Table 8에 보여지듯이 산출된 PVFS의 총 중량은 0.867ton으로 기존 하중에 포함되어도 최대 7ton이하로서 구조적 안정성에도 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.3.3 공정 영향

초고층 건축공사는 일반 건물에 비해 규모의 대형화, 시스템의 복잡화로 인해 모든 측면의 관리요소 및 리스크가 크게 증대되며, 추가적인 공기증가는 원가 측면에서 심각한 영향을 초래하게 된다. 따라서, PVFS의 운영에 따른 공정 영향에 대한 검토가 반드시 필요하다.

Table 9. Review for duration of PV system design and installation, and the time for formwork procurement

Category	Review results	
PV system manufacturing company	Duration of PV system design and fabrication	within 2 months
	Duration of PV array installation	within a week
	Duration of other equipment installation and electrical wiring	3~5 days
Formwork manufacturing company	contract time	starting at the foundation work
	supply time on the site	15 days before the RCS installation time

이를 위하여, 우선 국내 PV시스템 생산판매업체의 실무자 방문을 통해 PVFS에 대한 상세한 설명 후 PV시스템의 설계부터 설치까지의 소요기간에 대한 검토를 수행하

고, 사례 현장에 투입된 자동인양 거푸집 전문건설업체 실무자와의 면담을 통해 원도급업체와의 계약 완료시기, 현장 반입시기를 조사하였다(Table 9). 검토 결과를 토대로 case-study 현장 골조공사 공정 진행과 연계하여 PV시스템의 설계, 제작부터 PVFS 설치, 운영, 해체에 이르기까지 절차를 구축하였으며(Figure 5), 구축된 PVFS 운영 절차에 따른 공정지연 요소 발생 가능성에 대해 검토하였다.

Table 9에서와 같이 원도급업체와 거푸집 전문건설업체와의 계약은 기초공사 시작 시점에서 이루어졌으며, 사례 현장의 대상 건물 골조공사는 지하 2층부터 2층까지 약 3.5개월의 기간이 소요되었다. 따라서 이 기간 중에 RCS 설계에 기초하여 PV시스템의 설계 및 제작이 충분히 이루어질 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 대상 건물에 적용된 RCS는 현장에 반입하여 별도의 조립장에서 플랫폼, 레일, 난간 등 각 부속자재들의 조립을 진행하며, 설치되기 약 15일 전에 현장에 반입된 것으로 조사되었다. 따라서 제작된 PV시스템을 RCS와 동일 시점에 반입하고, RCS 조립시 PV어레이의 난간 설치 작업을 동시에 진행하면 공정 진행에 영향이 없을 것으로 검토되었다.

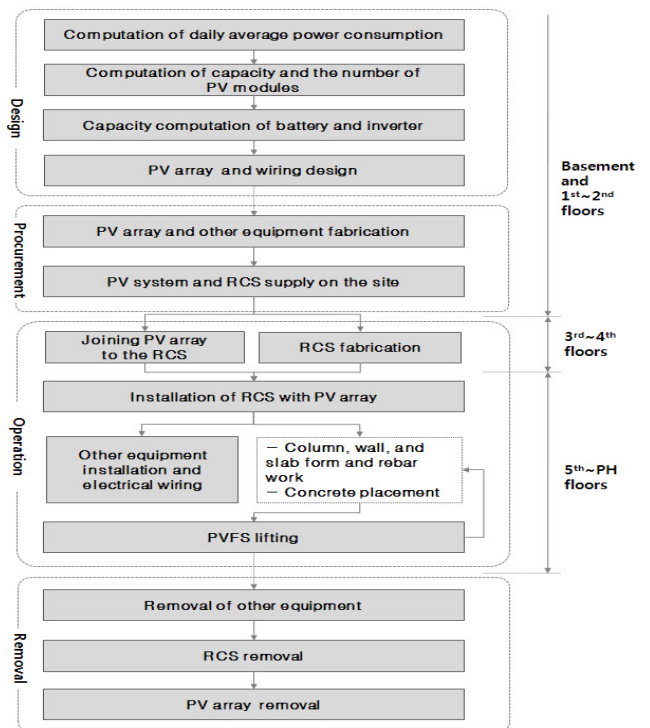


Figure 5. PVFS operation process

사례 현장의 경우 4층까지 콘크리트 타설이 완료된 후 RCS를 설치하여 최상층까지 골조공사를 진행하였으며, 따라서 RCS 설치 후 5층의 내부 벽체, 기둥 및 바닥 거푸집과 철근 공사, 콘크리트 타설이 진행되는 동안 축전지, 인버터 등의 기타설비와 전기 배선 작업을 진행하도록 프로세스를 구축하였다. 대상건물의 3층부터 7층까지는 기준층이 시작되는 시점으로 각각 10~19일의 골조공사 기간이 소요되었으며, 결과적으로 RCS 설치 후 5층의 내부 골조공사가 진행되는 기간 동안 공사 진행에 방해없이 RCS 발판 내에서 기타설비의 설치와 전기배선 작업을 완료하고 태양광에너지를 축전할 수 있을 것으로 판단되었다. 5층의 골조공사가 완료된 후에는 축전된 전기를 통한 PVFS 인양, 내부 거푸집 설치, 철근배근, 콘크리트 타설을 반복함으로써 공사를 진행하게 되며, PVFS는 건물의 최상부에서 운영됨으로써 파손 및 이물질 부착에 따른 효율저하 가능성은 낮은 것으로 검토되었다.

PVFS가 최상층까지 인양된 후, 설치시와 마찬가지로 내부 골조공사가 진행되는 동안 기타 설비를 해체하도록 함으로써, 공정 진행에 문제가 없을 것으로 판단되었다. 또한, PV어레이는 전체 골조공사가 완료된 후 RCS와 함께 해체하여 지상에서 분리하도록 절차를 구축함으로써 안전사고 발생 및 공정 지연 가능성을 배제할 수 있을 것으로 검토 결과 나타났다.

4.3.4 경제성

PVFS의 경제성 분석을 위해서는 우선 수익과 비용부분의 구분이 필요하며, 수익부분은 발전된 전력량, 온실가스 저감으로 인한 수입, 비용부분은 PV시스템 설치비용과 정기적인 설비유지보수비용(O&M)으로 구성된다. 이를 바탕으로 경제성을 분석하기 위한 순현재가치(Net Present Value; NPV)는 아래 식 (3)과 같이 산정된다.

$$NPV = \sum_{i=0}^n \left[\frac{B(i) + GHG(i)}{(1+r)^i} \right] - \left[C_0 + \sum_{i=0}^n \left[\frac{OM(i)}{(1+r)^i} \right] \right] \quad (3)$$

여기서,

B(i) : 전력판매수입

GHG(i) : 연간 온실가스 배출저감에 따른 배출권 수입

C₀ : 초기투자비

OM(i): 연간 유지보수(O&M)비용

r : 할인율

n : 태양광설비 사업기간

전력판매수입을 산정하기 위한 전력단가는 사례현장에서 사용된 산업용전력(병) 고압A(선택Ⅱ) 중간부하 시간대의 평균단가인 75원/kWh을 적용하였으며, 온실가스 저감량 산정계수는 에너지경제연구원에서 제시한 0.424tCO₂/MWh를 사용하였다. 연간 유지보수 비용은 기존 문헌 검토[13,14] 및 PV시스템 업체 전문가 면담을 통해 일반적인 적용수치인 초기투자비의 1%를 적용하였으며, 할인율은 환경부의 ‘환경정책의 비용/편익분석 지침서’를 참고하여 7%를 적용하였다. 또한 전문가 면담 결과 태양전지 모듈은 약 25~30년의 수명을 지니는 것으로 나타났으며, 태양전지 모듈의 수명을 기반으로 연속성이 불분명한 건설현장에 적용되는 점과 투입되지 않는 시기의 예측이 불가능한 점을 고려하여 20년으로 PVFS의 운영기간을 산정하였다.

PVFS는 독립형 PV시스템으로 운영되므로 앞에서 산정한 일평균 부하전력량인 3.23kWh를 생산전력으로 볼 수 있으며, 연간 약1,179kWh의 전력을 생산하게 된다. 이에 따른 온실가스 저감량은 연간 약 0.5tCO₂이며, 온실가스 배출권 거래가격은 2011년 1월 기준으로 2차 탄소배출권 가격이 약 ₩12로 형성되고 있으므로 21,000원으로 계산하였다.

초기투자비는 자재구매비 및 설치비의 합으로 산정되며, PVFS의 설계에 따라 국내 PV시스템 생산판매업체의 견적을 통해 도출하였다(Table 10).

Table 10. Initial costs of the PVFS

Category	Capacity	Quantity	Unit cost (won)	Sub total (won)
PV module	200W	11	600,000	6,600,000
Battery	12V 100AH	20	265,000	5,300,000
Inverter	20kW	1	15,000,000	15,000,000
Installation cost	-	1	3,000,000	3,000,000
Total cost				29,900,000

Table 11. Input data for the economic analysis of PVFS

Category	Calculation	Results(won)
B(i)	3.23kWh/day×365day×75won/kWh	88,421
GHG(i)	0.49tCO ₂ ×21,000won	10,497
C ₀	Table 10	29,900,000
OM(i)	C ₀ ×1%	299,000

경제성 분석을 위한 수익과 비용부분의 계산 결과는 Table 11과 같으며, 20년의 운영기간 및 할인율을 고려하여 산정한 PVFS의 NPV는 -33,780,000원으로 현 시점에서 수익성이 없는 것으로 분석되었다. 따라서, PVFS의 경제적 타당성을 확보할 수 있도록 NPV가 0이 되기 위해서는 태양전지 모듈 및 시스템을 구성하는 설비의 단가하락을 통한 시스템 초기투자비용의 감소가 요구된다.

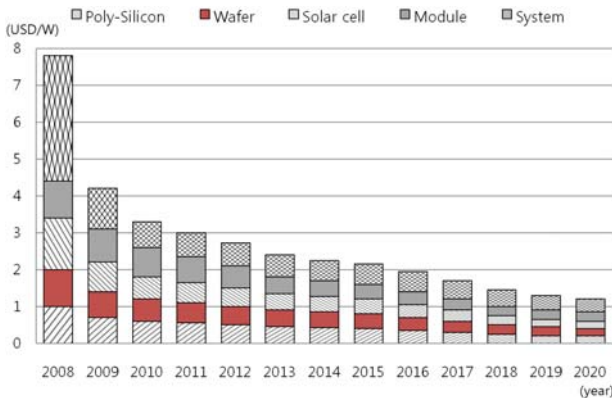


Figure 6. PV system market forecast

이렇듯 현재 태양광발전은 높은 시설 투자 비용으로 인해 태양전지를 이용하여 전기에너지를 생산하는 것은 대단히 비싼 방법이며, 우리나라를 비롯한 선진국에서는 설치보조금지원사업 및 발전차액지원제도 등 정부의 정책적 지원을 통해 태양광발전의 산업화에 노력하고 있다. 또한 Figure 6[15]에 보여지듯이, 태양광 발전 원가는 2008년 대비 50%이상 하락하였으며, 지속적인 원가 절감과 효율향상을 통해 경제적 지원없이 태양광에 의한 전력생산단가가 현재의 화석연료에 의한 생산단가와 동일해지는 시점인 그리드 패리티(Grid parity) 도달 시기가 앞당겨질 것으로 예상되고 있다. 국내의 경우도 한국전자통신연구원에서는 2세대 박막형 태양전지 개발을 통해 현재의 태양광 에너지 발전단가인 500원/kWh를 2015년까지 70원/kWh로 낮춤으로써 그리드 패리티 달성을 목표로 하고 있다. 이러한 추세를 감안할 때, 2015년 초기투자비가 현재의 15%수준으로 하락가능하며 NPV는 약 -3,440,000원으로 급격히 낮아지게 된다. 여전히 수익보다 비용이 크게 발생하지만, 화석 에너지원 고갈 위기에 따른 가격 상승 추이 및 시공현장의 그린이미지 제고를 통한 홍보효과 등을 고려하였을 때 PVFS의 경제적 타당성은 충분히 확보될 수 있을

것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 건축물의 초고층화 추세와 더불어 최근의 저탄소 녹색 성장 및 신재생에너지에 대한 개발 요구에 대응하여, 초고층 건축 시공단계에서의 신재생에너지 적용에 대한 가능성을 타진하였다. 아이디어 도출 및 전문가 자문을 통해 자동 인양 거푸집 상승시 사용되는 유압모터의 전력에 대한 태양광에너지 대체 방안을 강구하여 PVFS를 제안하였으며, case-study를 통해 시스템의 현장 적용 타당성 검토를 수행하였다. 검토 결과 본 연구에서 제안한 PVFS는 충분한 설치 면적 및 구조적 안전성 확보가 가능하며, 현장 내 설치, 운영과정에서의 공정 지연 요소의 발생 가능성은 미미할 것으로 판단된다. 다만, 태양광발전 전력생산단가가 높아 현재로서는 경제적 측면에서 현장 적용이 어려울 것으로 사료된다. 하지만, 현재 태양광발전 산업의 기술 발전 추이를 고려할 때 향후 5년 이내에는 경제성의 확보가 가능할 것으로 판단되며, 이에 따라 PVFS는 친환경적인 특성과 함께 건설현장의 전력부하 감소 및 현장 이미지 개선에 기여하는 효율적인 시스템으로 발전할 수 있을 것이다.

본 연구는 건축 시공 분야와 친환경 에너지의 접목에 대한 새로운 사례가 될 것이며, 신재생에너지를 시공환경에서 적용할 수 있다는 가능성을 제시함으로써 건축 분야의 에너지 소비 절감과 현장 이미지 제고를 통해 새로운 건축 환경 구축에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

하지만 본 연구에서의 PVFS 타당성 분석과정은 이론적인 검토와 전문가 자문에 국한되었으므로 향후 시험시공 또는 현장 적용을 통해 실질적인 데이터 확보가 요구되며, 여유 발전량에 따른 동일한 전기적 특성을 지닌 타 부하 및 공정으로의 활용 가능성 모색도 필요할 것으로 사료된다.

요 약

최근 환경문제 해결 및 미래 성장동력 확보를 위해 전 산업 분야에 걸쳐 친환경 에너지의 활용이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 설치장소의 제약이 없고 무한한 태양에너지를 활용한 태양광발전 산업에 관심이 집중되고 있으며, 건설산업에서도 건물통합형 태양광발전에 대한 연구와 사례

적용이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 최근 건축물의 초고층화는 시공단계에서의 에너지 소비를 크게 증가시키며, 이에 따라 시공단계에서의 친환경에너지 활용 방안에 관한 연구가 요구된다. 이에 본 연구에서는 초고층 거푸집 공사 전력공급을 위한 PV시스템(PVFS)을 제안하고 설계 및 적용타당성 분석을 수행함으로써, 건물시공 단계에서의 친환경 에너지 활용에 대한 가능성을 모색하였다. 사례연구를 통해 설계된 PVFS에 대한 설치면적위치 확보 및 거푸집 허용하중 초과 여부, 공정영향, 경제성 검토를 수행하였으며, 그 결과 기술발전을 통한 경제성 문제가 해결된다면 가까운 미래에 현장 적용 가능성이 충분할 것으로 판단되었다. 본 연구결과는 시공현장에서의 친환경 에너지 적용 가능성을 제시함으로써 친환경에너지 접목을 통한 새로운 건축환경 구축에 기여할 것으로 판단된다.

키워드 : 친환경 에너지, 초고층 건물, 시공단계, 태양광발전 기반 거푸집 시스템(PVFS), 타당성 분석

Acknowledgement

This research was supported by a grant (Code# '09 R&D A01) from the Cutting-edge Urban Development Program funded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of the Korean government.

References

- Han JK, Lee MS, Lim HS. A study on the performance of the application of building integrated photovoltaic system, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea 2009;343-6.
- Paul D, Mandal SN, Mukherjee D, Bhadra Chaudhuri SR. Optimization of significant insolation distribution parameters-A new approach towards BIPV system design, Renewable Energy 2010;35(10):2182-91.
- Choi JS, Ko JS, Chung DH. Development of a thermoelectric cooling system for a high efficiency BIPV module, Journal of Power Electronics 2010;10(2):187-93.
- Cheng CL, Sanchez Jimenez CS, Lee MC. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans, Renewable Energy 2009;34(6):1644-50.
- Lee HM, Oh MS, Kim HS. A study on the life cycle cost analysis of the see-through a-si building integrated photovoltaic system, Journal of the Korean Solar Energy Society 2009;29(1):1-10.
- Wei C, Hui S, Yong L. Performance evaluation of PV arrays at different tilt angles and orientations in BIPV, Acta Energetica Sinica 2009;30(2):206-10.
- Kim JH, Chu MJ, Chung YD, Park RM, Sung HK. Technological and industrial trends of thin film solar cells, Electronics and Telecommunications Trends 2008;23(6):2-11.
- Choi WJ. An experimental study on the optimal boundary & method of the movable type-louver photovoltaics to the building's application [MA dissertation]. Seoul: Dankook University; 2001.
- Lee SH. Photovoltaic power generating system, 1st Ed, Korea, Seoul:Kidari; 2008.
- Jung MW. Design method of photovoltaic system, KSES 2006 Spring Annual Conference 2006:31-49.
- PERI KOREA Ltd, PERI Handbook 2007, Korea, Seoul:PERI KOREA Ltd.; 2007.
- Yoon JH, Han KB, An YS, Chin KI. Experimental study on the combined effect of power and heat in 3kW roof integrated PV module system, KSES 2006 Spring Annual Conference 2006:276-81.
- Kim JH. Economic analysis on a PV system in an apartment complex, Climate Change Research 2010;1(2):163-77.
- Kim MC, Ju JW, Seo GH, Lee KH, Choi JM. The assessment of payback period for the photovoltaic system in residential building, Journal of the Korean Solar Energy Society 2007;27(2):87-93.
- Displaybank, Low-cost polysilicon, wafer technology market forecast, U.S.; 2009.