

# 실증 목업의 구축 및 데이터의 통계적 분석을 통한 건물일체형 태양광 발전시스템의 전력발전 향상 설계

이승준<sup>1</sup>, 이재천<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설생활환경시험연구원 에너지환경사업본부, <sup>2</sup>아주대학교 시스템공학과

## BIPV System Design to Enhance Electric Power Generation by Building up a Demonstration Mock-up and Analyzing Statistical Data

Seung-Joon Lee<sup>1</sup>, Jae-Chon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Energy & Environment Business Division, Korea Conformity Laboratories

<sup>2</sup>Dept. of Systems Engineering, Ajou University

요 약 건물일체형 태양광 발전(BIPV) 시스템은 태양광 모듈을 건축부자재와 결합하여 설치함으로써 주거, 보관, 경제성 요소 등의 건축물 기능을 만족시키면서도 태양광 발전기능을 동시에 수행하기 위한 통합시스템이다. 시스템 통합으로 인해 얻게 되는 장점이 있지만, 태양광 발전기능을 극대화할 수 있는 설계가 필요하다. 선행연구로서 컴퓨터 시뮬레이션과 실증으로 여러 가지 설계요소들이 발전성능에 미치는 영향분석 결과들이 발표되었지만, 발전성능 분석의 부정확성, 설계요소 간의 관계분석의 미흡, 제한된 실증 범위 등이 문제점으로 남아 있다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 먼저 발전성능을 실증으로 평가할 수 있도록 목업 시험등을 설계 및 구축하고, 실증시스템 운영에서 획득한 데이터의 통계분석을 수행한 결과를 바탕으로 설계 방안을 연구한다. 구체적으로 주요 설계요소로서 모듈의 종류(c-Si, a-Si), 설치각도(90°, 75°, 30°, 15°, 3°), 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향) 등을 선택하였다. 선택된 설계요소들의 발전성능에 대한 영향을 분석하기 위해, 1년간의 운영 데이터를 획득하여 통계적인 기법으로 데이터의 유효성을 검증하였으며, 또한 다양한 설계요소들 사이의 관계 분석을 통하여 발전성능이 최적화되는 설계안을 제시하였다. 이 연구결과는 향후 BIPV 시스템의 적용성 여부에 대해 판단할 때, 그리고 BIPV 시스템을 설계할 때 설계요소들의 최적 선택에 대한 자료가 될 수 있다.

**Abstract** In building-integrated photovoltaic (BIPV) systems, power generation functions are integrated into building functions by installing solar modules in combination with building materials. While this integration appears to be attractive, a design method is needed to achieve maximum power generation. Previously, the influence of the design elements on power generation was analyzed by computer simulations and demonstration tools. On the other hand, problems remain due to the inaccuracy of power generation analysis and relationship analysis, and limited demonstration. To solve this problem, this paper proposed the use of an extended demonstration mock-up. The mock-up was designed and constructed by implementing the design elements of the module types, installation angles, and direction. The actual operation data for one year were analyzed to evaluate the effects of the design elements on power generation. These results can be used to determine the feasibility of future BIPV systems and the optimal selection of system design elements.

**Keywords :** BIPV, Design Process, Mock-up Demonstration, Model-based Analysis, Statistical Analysis

본 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016M1A2A2940925).

\*Corresponding Author : Jae-Chon Lee(Ajou Univ.)

Tel: +82-31-219-3941 email: jaelee@ajou.ac.kr

Received March 23, 2018

Revised (1st May 11, 2018, 2nd May 30, 2018)

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

## 1. 서론

태양광 발전시스템은 기존의 화력, 수력, 원자력, 등의 발전시스템을 대체하는 신재생에너지 발전시스템 중에 하나로써, 전 세계의 보급량이 2016년 기준 약 75 GW가 설치되었으며 누적 설치량이 약 303 GW가 설치되어 다른 신재생에너지 대비 활발하게 보급되고 있다 [1]. 또한 건물, 도로, 농지, 철도 등의 시스템과 통합시스템으로 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 특히 BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 시스템은 기존 건축시스템에 태양광 발전시스템이 통합되어 건축물 기능과 태양광 발전기능을 만족시키는 대표적인 통합시스템이라고 할 수 있다.

BIPV 시스템은 건축물 기능의 요구사항과 태양광 발전 기능의 요구사항이 동시에 만족되어야 하며, 이러한 요구사항들은 BIPV 시스템의 설계단계에서 반영되어야만 한다.

BIPV 시스템의 설계단계에서는 외부환경, 디자인, 건축물 성능, 태양광 발전성능, 경제성 등의 설계요소들이 고려되어지며, 특히 태양광 발전성능은 경제성 향상에 가장 큰 영향을 미치고 건축설계의 방향을 결정하는 가장 중요한 요소라고 할 수 있다[2-3].

현재 BIPV 시스템은 설계단계에서 태양광 발전성능과 경제성 분석이 단순한 전산모사 프로그램의 시뮬레이션을 통한 분석 결과와 제한적인(일부 설치각도, 일부 설치방향) 실증에서의 분석 결과가 활용되고 있지만 실제 BIPV 시스템이 설치되는 장소의 태양광 발전성능(전력생산), 건축물 성능, 기존 건축자재 대체효과(대체비용) 등에 대한 정확한 데이터 분석이 실시되고 그 결과값이 설계단계에 반영되지 않고 있으며[7], 발주처와 설계사들은 설계단계에서 BIPV 시스템의 적용여부, 설치형태, 경제성 평가 등에 대한 의사결정이 합리적으로 이루어지고 있지 못한 상황이다. 이 문제를 해결하기위하여 본 연구에서는 BIPV 시스템의 설계단계에서 태양광 발전성능을 극대화하는데 크게 영향을 주는 주요 설계요소들(BIPV 모듈 종류, 설치각도, 설치방향)에 대하여 실제 현장을 모사한 mock-up 시험등을 체계적으로 설계 및 구축하는 방안을 제시하였고, 실증시스템 운영에서 획득한 데이터의 통계분석을 수행한 결과를 바탕으로 BIPV 시스템의 설계방안을 연구하였다. 구체적으로 주요 설계요소로서 모듈의 종류(c-Si, a-Si), 설치각도(90°,

75°, 30°, 15°, 3°), 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향) 등을 선택하였다. 선택된 설계요소들의 발전성능에 대한 영향을 분석하기 위해, 1년간의 운영 데이터를 획득하여 설계요소들의 발전성능과 설계요소 간의 관계를 분석하여 BIPV 시스템의 설계에 영향을 주는 요소들에 대한 정량적인 정보를 제공하고 발전성능이 최대화되는 설계안을 제시하였다. 또한 통계적인 방법을 활용하여 데이터의 유효성을 검증함으로써, 분석의 정확도를 향상시켰다. 본 연구의 결과는 BIPV 시스템 설계단계에서 발전성능 분석결과를 바탕으로 경제성 평가를 수행하고 BIPV 시스템의 적용여부를 결정하는 의사결정단계의 중요한 판단근거를 제시할 수 있으며, BIPV 시스템을 설계할 때 설계요소들의 최적 선택에 대한 자료가 될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장은 실증 mock-up 기반 BIPV 시스템의 발전성능 분석의 필요성과 연구동향에 대해 기술하였고, 2장은 BIPV 시스템의 선행연구 분석을 통한 문제정의, 연구 목표와 연구 방법을 기술하였다. 3장은 실증 mock-up BIPV 시스템 시험동 설계·구축 및 시험 방법을 제시하였고, 4장은 실증 mock-up을 통한 설계요소들의 태양광 발전성능 분석과 발전성능이 최적화되는 설계수준을 제시하였으며, 5장은 본 논문의 연구수행 결과를 정리하였다.

## 2. 예비적 고찰

### 2.1 BIPV 시스템의 설계요소 도출 및 발전성능 분석에 대한 연구

BIPV 시스템의 설계단계의 요구사항 분석을 통하여 BIPV 설계 프로세스와 업무(task)를 할당하였으며, 의사결정단계에서의 요구되는 BIPV 시스템의 주요 설계요소들의 결과물(Output)이 제시되었다[2-3].

BIPV 시스템의 태양광 발전성능에 대한 시뮬레이션 분석을 수행한 결과로써, BIPV 설계요소(일사량, 모듈 종류, 설치각도, 설치방향 등)에 따른 태양광 발전성능과 경제성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 또한, 설계요소들에 대한 제한적인 실증을 수행하였으며 시뮬레이션과 실증의 발전성능 차이에 대한 분석 결과가 제시되었다[4-6]. 하지만, 실증기반 태양광 발전성능 데이터에 대한 유효성 검증이 반영되지 않았으며, 설계요소들의

검증 범위가 제한적으로 반영되어 있어서 다양한 형태로 적용되는 BIPV 시스템의 발전성능을 분석한 결과, 결과값의 오차가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

### 2.2 발전성능 데이터의 신뢰성 분석 연구

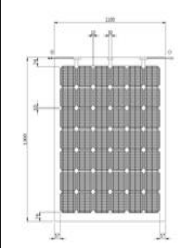
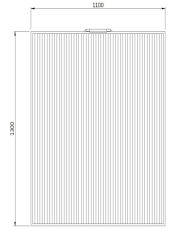
BIPV 시스템 설계에 있어서 태양광 발전성능에 중요한 영향을 미치는 태양빛의 일사량에 대한 데이터 유효성을 확보하기 위하여 통계적인 방법을 사용하여 분석되었다[8]. 또한 설계자 관점에서의 주요 설계요소를 식별하였으며, 통계 프로그램인 미니탭(Minitab)의 기술통계 분석(Descriptive statistical analysis)을 사용하여 BIPV 시스템이 설치되어 있는 장소의 일사량 데이터의 유효성을 검증하였으며, 이를 통하여 BIPV 시스템 설계 및 의사결정단계에서의 데이터 신뢰성을 확보하고자 하였다. 하지만 입력값(Input)의 범위를 태양빛의 일사량으로 한정하여, 실제 주요 설계요소(BIPV 모듈의 종류, 설치각도, 설치방향 등)들에 대한 명확한 데이터 유효성 분석이 이루어지지 않았으며, 설계요소들의 출력값(발전성능)에 대한 데이터 유효성 분석도 이루어지지 않았다.

BIPV의 경우, 일반 태양광 시스템과 달리 건축물에 통합되는 시스템 구성으로 주요 설계요소들이 건축물 설계(방향, 위치 등)에 따라 영향을 받는다. 따라서 다양한 방향과 각도의 설치형태를 이루고 있으며, 설치각도와 설치방향에 따라 태양광 일사량 및 태양광 발전성능이 다르게 나타나는 특성을 가지고 있다. 하지만, 현재까지 설계단계에서 다양한 설치형태에 대하여 전산모사를 통한 시뮬레이션 분석 결과만이 판단근거로 활용되고 있으며 명확한 실증을 통한 데이터 분석은 이루어지고 있지 않다. 이러한 실증데이터를 활용한 각 설계요소들에 대한 발전성능 분석 결과는 BIPV 설계 및 의사결정 단계에서 합리적인 판단이 이루어질 수 있도록 근거를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.3 BIPV 모듈 특성에 대한 기본성능시험

BIPV 시스템에 적용되는 BIPV 모듈의 발전성능에 대한 예비적인 시험을 통하여 실증 목업 설계단계에서의 어레이(Array) 구성과 발전성능을 비교할 수 있는 기준 데이터를 확보하였다. Table. 1은 실증 목업에 사용되는 BIPV 모듈인 결정질 실리콘(c-Si) 모듈과 박막 실리콘(a-Si) 모듈의 구성을 나타내고 있다.

Table 1. Detailed composition of BIPV module

Classification	c-Si module	a-Si module
Type	Glass to Glass	Glass to Glass
Size	1100×1300 mm	1100×1300 mm
Transmittance	10 %	10 %
Power	161 W	82 W
Cell Block Diagram		

BIPV 모듈의 발전성능은 Fig. 1과 같이 구성된 최대 전력 측정장치를 사용하여 태양광 국제표준인 IEC 61215(결정질 실리콘 태양전지), IEC 61646(박막 태양전지) 표준에 따라 측정이 되었다[9-10].

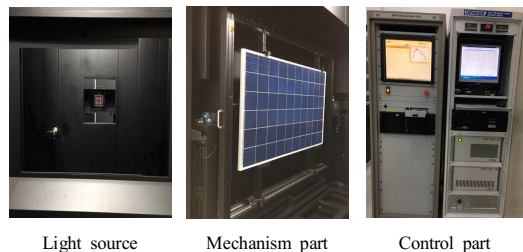
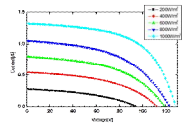
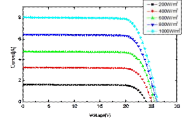


Fig. 1. Composition of BIPV Measurement system

결정질 실리콘(c-Si) 모듈의 표준인 IEC 61215의 10.2항과 박막 실리콘(a-Si) 모듈의 표준인 IEC 61646의 10.2항에 제시된 모듈의 시험절차에 따라서 BIPV 모듈의 발전성능을 측정된 결과는 Table. 2에 나타난다. 기준 광조사량인 1000W/m<sup>2</sup>에서 결정질 실리콘(c-Si) 모듈은 전압(Voc) 26.21 V, 전류(Isc) 8.05A, 최대전력(Pm) 160.21W를 나타내고 있으며, 박막 실리콘(a-Si) 모듈은 전압(Voc) 126.48V, 전류(Isc) 1.31A, 최대전력(Pm) 81.61W를 나타내고 있다. 결정질 실리콘(c-Si) 및 박막 실리콘(a-Si) 모듈의 정격용량인 최대전력 161W와 82W 보다 측정값이 0.1 % 정도 감소되었다. 실증 목업 시험에 사용되는 BIPV 모듈의 발전성능은 국제표준(IEC) 시험 결과에 근거하여 유효하다고 할 수 있다.

Table 2. Power output characteristics of BIPV modules

Test conditions	- Cell Temp. : 25 °C - Wind Speed : below 1 m/s - Irradiation : Class AAA condition							
	No. Module	Prp[W]	Isc[A]	Voc[V]	Vmp[V]	Ipm[A]	FF	
c-Si module	1	200	30.95	1.62	24.02	20.17	1.52	0.80
	2	400	64.11	3.23	25.07	20.89	3.07	0.79
	3	600	95.69	4.84	25.99	22.97	4.62	0.78
	4	800	128.97	6.45	25.95	22.94	6.38	0.77
	5	1000	162.21	8.05	26.21	23.03	7.69	0.76
a-Si module	1	200	10.71	0.23	84.38	58.02	0.18	0.41
	2	400	20.13	0.45	112.43	74.96	0.38	0.46
	3	600	29.87	0.68	119.12	80.30	0.57	0.48
	4	800	39.84	1.05	123.40	83.10	0.77	0.49
	5	1000	49.61	1.31	125.48	84.12	0.97	0.49



2.4 문제정의 및 연구 목표

BIPV 시스템의 설계단계에서 태양광 발전성능은 경제성 분석에 중요한 인자이고 설계사와 발주처에서 의사결정을 하는데 중요한 영향을 끼친다. 하지만 현재 BIPV 시스템의 태양광 발전성능 분석 및 설계단계에서의 결과반영은 다음의 사항들에 대하여 고려하지 못하고 있다.

- 1) BIPV 시스템의 설계요소에 대한 발전성능이 컴퓨터 시뮬레이션 분석결과와 제한된 실증범위에서 수행되고 있으며 발전성능 분석의 부정확성, 설계요소 간의 관계분석의 미흡, 등의 문제점이 남아있어서 BIPV 시스템의 설계와 적용성 여부의 의사결정 단계에서 정확한 판단근거를 제시하지 못하고 있음
- 2) 실증 목업의 발전성능에 대한 연간 데이터 분석에 활용되는 다량의 데이터들에 대한 유효성 검증을 통한 데이터의 신뢰성 확보가 이루어지지 않았음
- 3) BIPV 시스템의 발전성능에 영향을 미치는 설계요소(모듈, 설치각도, 설치방향)들에 대한 영향 분석이 정량적으로 분석되지 못하여 태양광 발전기능을 극대화할 수 있는 BIPV 시스템의 설계가 이루어지지 않았음

따라서 BIPV 시스템에 대한 설계요소들의 데이터 유효성을 검증하며, 실증 목업 데이터베이스(Data Base)기반으로 BIPV 시스템의 설계요소들에 대한 통계적인 관계분석을 수행하여, 실제 건물적용에서 요구되는 설계요소간의 관계를 정량적으로 도출하여 설계단계에서 태양광 발전성능의 극대화 방안을 제시하고자 한다.

3. BIPV 시스템 목업(Mock-up) 시험동 설계·구축 및 시험 개요

3.1 BIPV 시스템 목업 설계 및 구축 기능

목업(Mock-up)기반 태양광 발전성능을 평가하기 위하여 Table. 3와 같이 BIPV 설계요소를 고려하여 실증 목업 시험동을 설계하였으며, 충청남도 서산시에 위치한 한국건설생활환경시험연구원(KCL) 옥외실증시험센터에 Fig. 2와 같이 구축하였다.

BIPV 시스템은 동일한 바닥면적에 설치되어도 설치방향과 설치각도에 따라 발전성능에 차이가 발생하게 된다. 따라서 BIPV 시스템의 실증 목업은 다양한 설치형태의 적용 가능성을 고려하여 각도, 방향에 따른 발전성능을 평가할 수 있는 설계가 요구되며, 각 설치부위에서 동일 면적의 결정질과 박막 실리콘 BIPV 모듈을 배치하여 시스템의 발전성능을 파악하고 외부환경(일사량, 온도, 습도 등)에 따른 발전성능을 평가할 수 있는 데이터베이스(D/B) 구축이 가능하도록 목업 실증 시험동을 설계하였다.

Table 3. BIPV mock-up design summary

○ Construction Size : floor area 238 m <sup>2</sup>
○ Architectural
- Azimuth : West(W), South-West(SW), South(S), South-East(SE), East(E)
- angles : 90°, 75°, 30°, 15°, 3°
○ Electrical
- power generation, power consumption, etc.
○ Environmental : solar radiation, temperature, etc.
○ Monitoring method
- MPPT method using electronic load

실증 목업 시험동은 주요 설계요소인 설치방향을 태양광의 입사량이 현저하게 떨어지는 북향을 제외한 5개 방위(남향, 남동향, 남서향, 서향, 동향)를 반영하였으며, 설치각도는 대표적인 건축형태인 커튼월 형태로 분류되는 3개의 각도(90°, 75°, 30°)와 지붕 형태로 분류되는 2개의 각도(15°, 3°)를 고려하여 설계하였다. 시험동에 적용된 BIPV 모듈은 총 120장의 모듈을 설치하였으며, 결정질 실리콘 모듈 60장과 박막 실리콘 모듈 60장을 각 설치방향, 설치각도에 따라 동일하게 설치하여 BIPV 모듈간의 발전성능 차이를 검증할 수 있도록 설계하였다.



Fig. 2. Mock-up demonstrated, side view

### 3.2 데이터베이스 구축 및 분석방법

데이터를 취득하는 모니터링 방식은 Fig. 3과 같이 전자부하(Electronic Load)를 이용한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 방식으로 정확도를 높일 수 있도록 구성하였으며, 15분 단위로 스위칭하여 외부환경(일사량, 온도, 풍속, 강수량 등) 데이터와 발전성능(최대전력측정, 모듈 온도, I-V curve 등) 데이터를 취득할 수 있도록 데이터베이스를 구성하였다.

각 그룹의 측정결과는 서버에 저장되어 기상관측 자료 등과 통합 DB를 구축 할 수 있다.

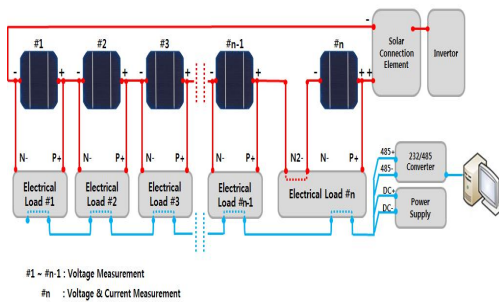


Fig. 3. Mock-up monitoring system

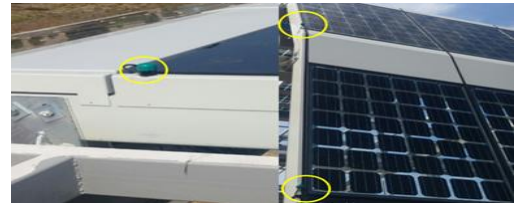
발전성능에 영향을 줄 수 있는 외부환경과 내부 환경 인자들의 영향을 측정할 수 있도록 Fig. 4와 같이 BIPV 모듈 종류별, 설치각도별, 설치방향별로 측정 센서(Sensor) 설치하여 환경데이터를 취득하였다.

다량으로 취득되는 데이터들의 유효성을 검증하기 위하여 대표적인 데이터분석 프로그램인 미니탭(Minitab)의 통계적 분석방법인 분산분석(ANOVA) 방법을 사용하여, 외부 및 내부환경 인자들의 데이터 분석을 하였으며, 발전성능평가 인자들의 데이터 유효성과 관계성을 분석하기 위하여 통계적인 상관분석(Correlation analysis)



Module Temp. sensor

Indoor Temp. sensor



Irradiation sensor for installation angle and azimuth

Fig. 4. Installation of measurement sensors

과 분산분석(ANOVA)의 유의차를 분석하였다. 상관분석은 피어슨 상관계수 0.9이상을 기준으로 강한 상관관계에 대한 검증을 하였으며, AVOVA 유의차 분석은 분석 신뢰도 95 %를 기준으로 유의확률(p-value)를 분석하여 데이터군의 평균값들의 유의차를 검증하였다.

### 3.3 BIPV 시스템 발전성능 비교평가

BIPV 시스템의 목업 실증에서의 실측 태양광 발전성능에 가장 크게 영향을 미치는 태양빛의 일사량에 따른 BIPV 시스템의 발전특성을 검증하기 위하여 태양광 발전특성 분석에 일반적으로 활용되고 있는 미국 샌디아(Sandia)연구소 모델기반의 시뮬레이션 예측 결과와 BIPV 모듈의 발전성능 측정결과를 비교하고 검증하였다.

아래의 Table. 4, Fig. 5는 실험실에서 측정된 BIPV 모듈의 광조사(200 W/m<sup>2</sup> ~ 1,000 W/m<sup>2</sup>)에 따른 모듈의 발전특성의 실측값과 샌디아 모델기반으로 계산된 시뮬레이션의 태양광 발전성능 예측값을 비교한 데이터이다.

Table 4. Comparison between actual measurement and prediction(Sandia model) for BIPV modules

Classification	Power(c-Si) [W]		Power(a-Si) [W]	
	Pred.	Meas.	Pred.	Meas.
200 W/m <sup>2</sup>	32.65	30.95	15.2	10.71
400 W/m <sup>2</sup>	65.14	64.11	30.76	28.13
600 W/m <sup>2</sup>	97.26	96.89	47	45.87
800 W/m <sup>2</sup>	128.95	128.97	63.99	63.84
1000 W/m <sup>2</sup>	160.18	160.21	81.79	81.61



결정질 실리콘(c-Si) 모듈과 박막 실리콘(a-Si) 모듈의 다양한 광조사 범위에서의 태양광 발전성능을 분석한 결과, 전반적으로 발전성능의 실측값과 예측값이 동일하게 변하는 경향을 보이고 있으나, 낮은 광조사(200 W/m<sup>2</sup> ~ 600 W/m<sup>2</sup>) 범위에서의 발전성능은 조금의 차이를 알 수 있다. 낮은 광조사 범위에서의 발전성능은 실제 BIPV 시스템에 구성되는 인버터(Inverter)의 구동 제한 전력 이하의 값을 나타내고 있으므로 BIPV 시스템의 발전성능에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 분석된다.

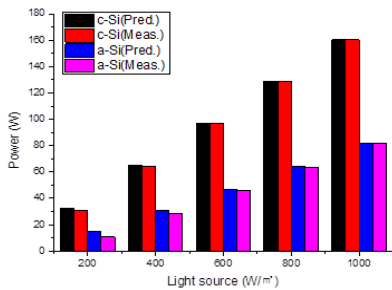


Fig. 5. Comparison between Sandia prediction and BIPV module power characteristic

#### 4. 목업실증 데이터기반 BIPV 시스템의 발전성능 분석

##### 4.1 통계적 방법을 활용 데이터 유효성 검증

실증 목업 시험장에서 수집되는 수많은 데이터 값들이 측정센서의 오류나 장비의 오동작 등에 따른 데이터 오류가 발생 되었는지, 설계요소별로 취득한 데이터들이 서로 독립적으로 작용하는지에 대하여 태양광 일사량과 발전성능에 대한 통계적인 분석을 활용하여 데이터 유효성을 검증하였다.

일사량에 대하여 수평일사량(3°)과 경사일사량(15°, 30°, 75°, 90°) 데이터들에 대하여 통계처리 프로그램인 미니탭(Minitab)의 분산분석(AVOVA)을 사용하여, 데이터 값들의 독립성, 등분산성, 정규성 등의 유효성을 검증하였다.

Fig. 6은 설치각도별 일사량 데이터의 정규성을 검증하기 위하여 미니탭의 정규성 검증(Normality test)를 진행한 결과이다. 설치각도(3°, 15°, 30°, 75°, 90°)에 대하여 1년 동안 수집된 일사량 데이터 값들이 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 이상으로 데이

터 값들이 정규성을 가진다고 분석된다.

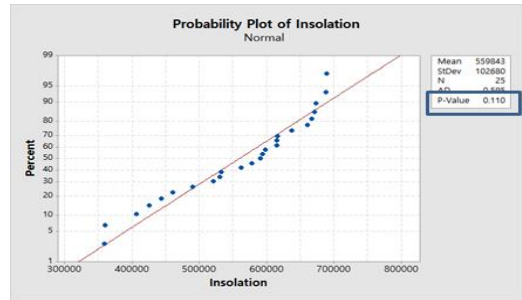


Fig. 6. Normality test for insolation

Fig. 7은 설치각도별 일사량 데이터 값들의 독립성, 등분산성을 검증하기 위하여 미니탭의 분산분석(AVOVA)을 진행한 결과이다.

모니터링 기간(2017년 1월 ~ 2017년 12월)동안의 설치각도별 일사량 데이터 값들의 분산을 비교한 결과, 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 미만으로 데이터 값들이 차이가 있다(유의하지 않다)라고 할 수 있다. 잔차그림(Residual Plot)에서 데이터의 분포도(Fits, Order)의 패턴을 평가함으로 등분산성과 독립성을 평가할 수 있다. 잔차 그림의 분포도(Fits)를 평가한 결과, x축으로 연속적인 특정한 패턴을 보이지 않으므로 등분산성과 독립성을 가진다고 분석된다.

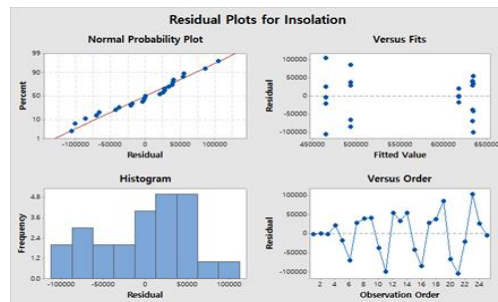
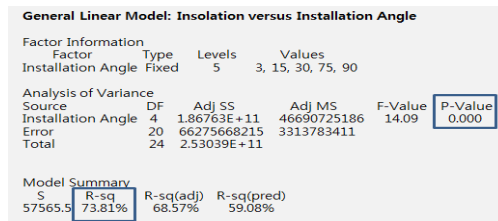


Fig. 7. ANOVA analysis result for insolation

BIPV 시스템의 발전량에 대하여 BIPV 모듈의 종류 (c-Si, a-Si), 설치각도(3°, 15°, 30°, 75°, 90°), 설치방향 (동향, 남동향, 남향, 남서향, 서향)에 따른 발전량 데이터 값들에 대하여 통계처리 프로그램을 사용하여, 데이터의 독립성, 등분산성, 정규성 등의 유효성을 검증하였다.

Fig. 8은 모듈의 종류, 설치각도, 설치방향에 따른 발전량 데이터의 정규성을 검증하기 위하여 미니탭의 정규성 검증(Normality test)를 진행한 결과이다. 1년 동안에 수집된 발전량의 데이터 값들이 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 이상으로 데이터 값들이 정규성을 가진다고 분석된다.

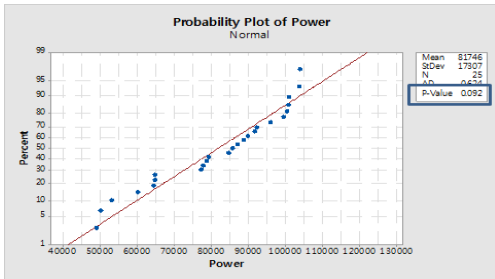


Fig. 8. Normality test for insolation

Fig. 9는 발전량 데이터 값들의 독립성, 등분산성을 검증하기 위하여 미니탭의 분산분석(AVOVA)을 진행한 결과이다.



Fig. 9. ANOVA result for insolation

모니터링 기간(2017년 1월 ~ 2017년 12월)동안의 발전량 데이터 값들의 분산을 비교한 결과, 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 미만으로 데이터 값들이 차이가 있다(유의하지 않다)라고 할 수 있다. 잔차그림(Residual Plot)에서 데이터의 분포도(Fits, Order)의 패턴을 평가함으로 등분산성과 독립성을 평가할 수 있다. 잔차그림의 분포도(Fits)를 평가한 결과, x축으로 연속적인 특정한 패턴을 보이지 않음으로 등분산성과 독립성을 가진다고 분석된다.

BIPV 시스템 실증 목업에서 1년 동안 수집된 태양광 일사량과 설계요소별 태양광 발전성능(발전량)을 통계적인 분석을 진행한 결과, 데이터의 유효성을 가지는 것으로 분석되었으며 본 연구에 활용되는 데이터의 신뢰성을 확인하였다.

#### 4.2 설계요소별 일사량과 발전량 상관 분석

BIPV 시스템의 발전성능에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 BIPV 모듈에 입사되는 태양빛의 일사량이다. 일사량은 건축물의 설계에 있어서도 건축성능(단열성능, 건물에너지 등)을 결정하는 중요한 인자이다. 설계요소별(모듈의 종류, 설치각도, 설치방향) 일사량과 발전량의 관계를 분석함으로써 BIPV 적용 건축물 설계와 시뮬레이션 프로그램의 기준 데이터를 제공함으로써 시뮬레이션의 정확도 향상에 도움을 줄 것으로 판단된다.

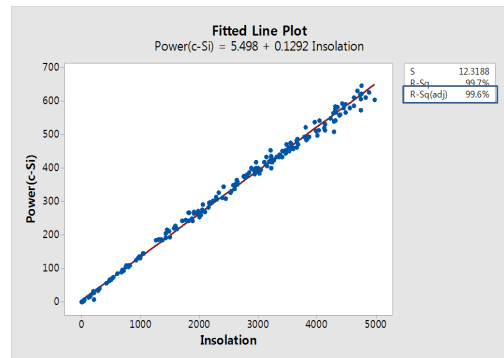


Fig. 10. Correlation analysis between insolation and power generation (installation angle: 3°, azimuth: west)

일사량과 발전량의 상관관계는 통계처리 프로그램인 미니탭(Minitab)의 상관분석을 사용하였으며, 피어슨 상관계수로 상관관계를 해석하였다.

피어슨 상관계수( $R^2$ )는 0.1부터 1.0까지의 범위를 가지며 상관계수 1.0은 완전한 선형 상관관계, 0.7부터 1.0은 높은 선형 상관관계, 0.4부터 0.7은 중간 선형 상관관계, 0.1부터 0.4는 낮은 선형 상관관계로 해석된다.

Fig. 10은 설치방향 서향, 설치각도  $3^\circ$ 에서의 일사량과 발전량의 상관관계를 분석한 결과이다. 피어슨 상관계수( $R^2$ ) 값이 0.996으로 높은 선형 상관관계를 가지고 있다고 분석된다. 일사량 대비 발전량의 관계를 아래 식(4. 1)과 같은 일차함수의 형태로 표현할 수 있다.

$$P = aI + b \quad \text{식(4.1)}$$

$P$  : BIPV 시스템의 누적 발전량(Power)

$I$  : 일일 누적 일사량(Insolation)

$a$  : 영향계수

$b$  : 상수

Table. 5는 설계요소(모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)에 대한 일사량과 발전량의 상관분석 결과값을 일차 선형관계로 근사하여 발전량에 영향을 미치는 일사량의 영향계수  $a$ 에 대하여 건축물 설계에 적용 가능한 수준에 따라 시험한 결과이다.

Table 5. Influence coefficient for design elements(BIPV module, installation azimuth and angles)

Azimuth	Module	$3^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
West	c-Si	0.132	0.139	0.134	0.123	0.129
	a-Si	0.070	0.081	0.080	0.051	0.050
South-West	c-Si	0.142	0.145	0.140	0.147	0.147
	a-Si	0.076	0.065	0.081	0.075	0.062
South	c-Si	0.128	0.140	0.146	0.144	0.137
	a-Si	0.081	0.064	0.085	0.063	0.060
South-East	c-Si	0.140	0.142	0.145	0.133	0.129
	a-Si	0.050	0.069	0.079	0.057	0.061
East	c-Si	0.140	0.144	0.139	0.138	0.138
	a-Si	0.089	0.060	0.081	0.058	0.048

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 BIPV 시스템의 설계요소(모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)별 영향계수를 분석한 결과이다.

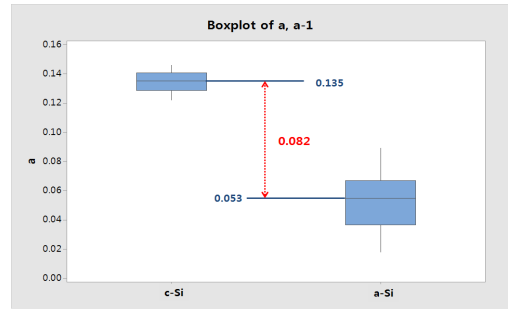


Fig. 11. Box plot analysis for influence coefficient (installation angle :  $3^\circ$ , azimuth : west)

BIPV 모듈 종류(c-Si, a-Si)에 따라서 영향계수  $a$ 값을 상자그림(Boxplot)으로 분석한 결과, c-Si 모듈의 경우, a-Si 모듈의 영향계수보다 2.5배 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 c-Si 모듈이 a-Si 모듈보다 일사량에 따른 발전성능이 2.5배 크다고 분석할 수 있다. [2. 3 모듈의 기본성능 시험]에서 발전성능(최대전력) 측정값이 c-Si 모듈이 a-Si 모듈보다 1.9배 높게 측정된 것과 비교하여 분석하면 시험실의 모의광원(파장 : 200nm-1100nm)에서 BIPV 모듈(c-Si, a-Si)은 전체 파장대의 광을 흡수하여 발전을 하지만, 실제 건물에 적용되는 BIPV 시스템에서는 인버터의 전압·전류 제한으로 낮은 전력은 발전성능에 영향을 미치지 않는 것에 따른 차이가 발생한 것으로 분석된다.

Fig. 12, Fig. 13은 BIPV 모듈(c-Si, a-Si)의 설치각도와 설치방향에 따른 영향계수  $a$ 값을 등고선 그림(Contour plot)으로 분석한 결과이다.

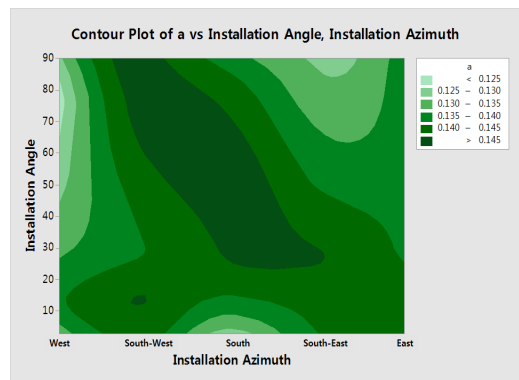


Fig. 12. Contour plot analysis for influence coefficient (c-Si, installation azimuth and angles)



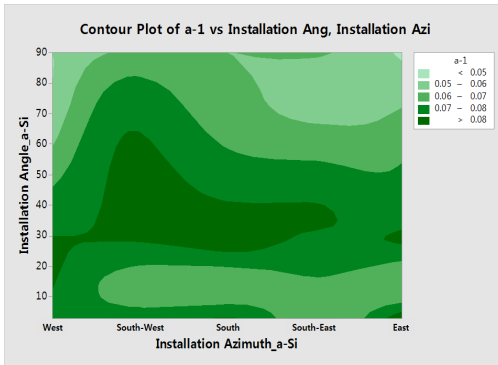


Fig. 13. Contour plot analysis for influence coefficient (a-Si, installation azimuth and angles)

c-Si 모듈의 경우, 영향계수 a값이 설치각도와 설치방향에 따른 영향을 비등하게 받는 것으로 분석되며, 발전 성능이 높게 나타나는 설치방향은 남서향(South-West)과 남향(South)이며, 설치각도는 30° - 90° 사이인 것으로 분석된다. 특히 남서향의 경우, 설치각도 남서향의 설치각도 45° - 90°의 발전성능 높게 나타났으며, 남향의 경우, 설치각도 30° - 75°의 발전성능이 높게 나타남을 알 수 있다.

a-Si 모듈의 경우, 영향계수 a값이 설치방향 대비하여 설치각도에 크게 영향을 받는 것으로 분석되며, 설치각도는 30° - 60° 사이의 일사량 대비 발전성능의 영향계수 a값이 높게 나타남을 알 수 있다. 설치방향에 있어서는 남서향(South-West), 남향(South) 및 남동향(South-East)에서 발전성능이 좋게 나타남을 알 수 있다.

모듈의 종류에 따른 영향계수 분석은 BIPV 시스템 설계단계에서 발전성능을 고려하여 BIPV 모듈을 선택할 시에 설치각도와 설치방향에 따른 일사량과 발전량의 관계를 판단할 수 있는 지표로 사용할 수 있으며, 이는 BIPV 시스템 설계기능 향상과 의사결정에 중용한 요소가 될 것으로 판단된다.

### 4.3 설계인자간 발전성능 관계 분석

목업 실증에서 1년간(2017.01.01 - 2017.12.31) 수집된 BIPV 시스템의 발전성능 데이터를 기반으로 설계요소별(모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)들이 발전성능에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 13, Fig. 14에서 일반적으로 발전성능이 우수한 남향에서의 월별 누적일사량과 누적발전량을 비교하였으며, Fig. 15, Fig. 16에서 설계

요소들이 연간 누적발전량에 미치는 영향을 미니탭의 주요효과와 상호작용 분석을 통하여 분석하였으며, Fig. 17에서 회귀분석을 통하여 설계요소와 발전성능의 회귀식을 도출하였다.

또한, Fig. 18, Fig. 19에서 등고선그림 분석을 통하여 c-Si 모듈과 a-Si 모듈에서 발전성능이 최적으로 나타나는 설치각도와 설치방향을 제시하였다.

Table. 6은 설계요소에 대한 발전성능(누적발전량)의 결과값이다.

Table 6. Cumulative Annual Power Generation (kWhr) by Installation Azimuth and Angles

Azimuth	Module	3°	15°	30°	75°	90°
West	c-Si	86.9	85.7	89.3	53.2	49.1
	a-Si	44.3	47.3	49.7	38.8	28.8
South-West	c-Si	92.1	99.5	100.8	77.8	64.8
	a-Si	45.9	46.2	50.9	40.8	33.6
South	c-Si	84.6	100.3	103.6	77.1	50.1
	a-Si	49.5	51.9	57.1	36.4	32.3
South-East	c-Si	95.8	100.2	104.2	78.7	64.5
	a-Si	38.6	51.5	52.0	31.3	32.6
East	c-Si	89.8	91.5	92.6	60.2	64.8
	a-Si	36.1	46.3	46.8	34.2	31.2

목업 실증 시험동은 충남 서산시에 위치한 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에 위치하고 있으며, Fig. 13은 설치방향(남향)을 기준으로 월별 누적일사량을 나타내고 있다. 1년을 계절별로 구분하였을 경우, 봄(3월-5월) 기간의 일사량이 가장 높게 나타나고 있으며, 가을(9월-11월), 여름(6월-8월), 그리고 겨울(12월-2월)의 순서대로 일사량이 높게 나타남을 알 수 있다.

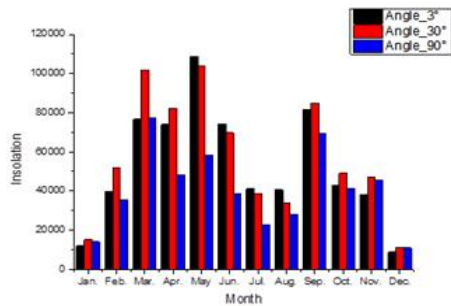


Fig. 13. Comparison monthly cumulative insolation for installation angles(3°, 30°, 90°)

Fig. 14는 설치방향(남향)을 기준으로 모듈 종류별 (c-Si, a-Si), 설치각도별(3°, 30°, 90°)에 따른 월별 누적 발전량을 나타내고 있다. 전반적으로 월별 누적일사량과 유사한 경향성을 보인다. c-Si 모듈이 a-Si 모듈 대비 높은 발전성능을 나타내고 있으며, 설치각도에 있어서는 설치각도 30°에서 높은 발전성능을 나타내고 있다.

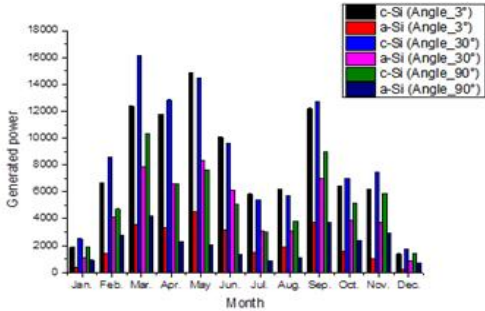


Fig. 14. Comparison monthly cumulative power generation for installation angles(3°, 30°, 90°)

Fig. 15, Fig. 16에서 설계인자들이 연간 누적발전량에 미치는 영향을 미니탭의 주요효과와 상호작용 분석을 통하여 분석한 결과이다.

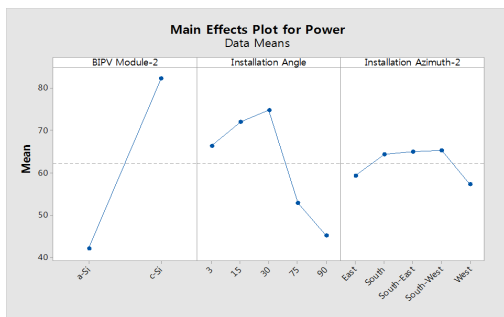


Fig. 15. Main effect plot analysis for design elements (BIPV module, installation azimuth and angles)

BIPV 모듈은 c-Si 모듈이 a-Si 모듈 대비 높은 발전성능을 나타내고 있으며, 설치각도는 30°, 15°, 3°, 75°, 90°의 순서대로 발전량이 높게 나타났으며, 설치방향은 남향, 남서향, 남동향의 발전성능은 높게 나타났으며, 동향, 서향의 경우, 상대적으로 발전성능은 낮게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 16에서 모듈의 종류, 설치각도, 설치방향의 상호작용에 대한 분석에서 BIPV 모듈, 설치각도, 설치방향의 경향성을 나타내는 직선들이 서로 교차 되지않는 특성을 나타냄으로 각 설계요소간의 특별한 상호작용은 없는 것으로 나타나고 있다.

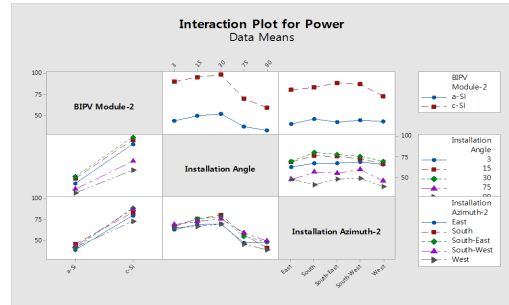


Fig. 16. Interaction plot analysis for design elements (BIPV module, installation azimuth and angles)

Fig. 17은 설계요소(모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)들이 발전성능에 미치는 영향을 미니탭의 회귀분석을 수행한 결과이다. 2개의 모듈종류(c-Si, a-Si), 5개의 설치각도(3°, 15°, 30°, 75°, 90°)와 5개의 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향)에서 1년 동안 측정된 발전성능(누적발전량)에 대하여 1차 선형모델(Linear Model)로 회귀분석을 실시한 결과, 발전성능(누적발전량)은 BIPV 모듈의 종류에 따라서 가장 크게 영향을 받는 것으로 분석되며, 설치방향, 설치각도에 따라서는 모듈의 종류에 따른 영향대비 상대적으로 적게 영향을 받는 것으로 분석된다. 따라서 BIPV 설계단계에서 경제성을 고려하여 설계인자를 결정해야한다면 우선적으로 모듈의 종류를 고려해야하는 것으로 분석된다.

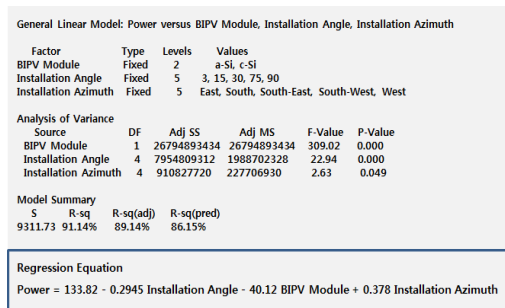


Fig. 17. Regression analysis for power generation of design elements(module, installation azimuth and angles)

Fig. 18, Fig. 19은 c-Si 모듈과 a-Si 모듈에서의 설치 각도와 설치방향에 따른 발전성능(누적발전량)을 등고선 그림을 분석한 결과이다.

c-Si 모듈의 경우, 남서향, 남향, 남동향의 설치방향, 설치각도 15°-45°에서 가장 높은 발전성능을 보이고 있으며, 서향, 동향의 설치방향 45°이상의 설치각도에서 발전성능이 감소되는 것으로 분석된다. 서향의 설치방향에 70°이상의 설치각도에서 가장 낮은 발전성능이 나타남을 알 수 있다.

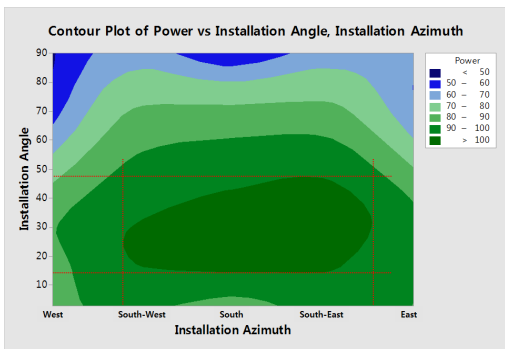


Fig. 18. Contour plot analysis for power generation of design elements(c-Si, installation azimuth and angles)

a-Si 모듈의 경우, 남향의 설치방향, 설치각도 20°-40°에서 가장 높은 발전성능을 보이고 있으며, 서향, 동향의 설치방향 20°-40°의 설치각도를 벗어날수록 발전성능이 감소되는 것으로 분석된다. 전체 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향)에서 90°에 가까운 설치각도에서 가장 낮은 발전성능을 보임을 알 수 있다.

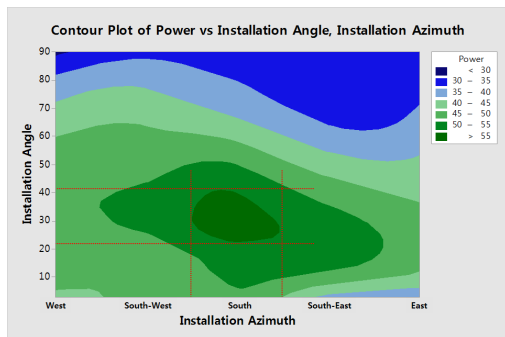


Fig. 19. Contour plot analysis for power generation of design elements(a-Si, installation azimuth and angles)

이와 같이 실제 현장을 모사한 목업 시험을 통하여 설계요소별 발전성능에 대한 데이터를 통계적인 방법으로 분석하고, 각 설계요소들의 발전성능에 대한 관계를 분석함으로써, 실제 BIPV 시스템 설계에서 고려되어야 할 설계요소를 식별할 수 있으며, 기존 설계에 사용되어지는 전산모사 프로그램과의 기준 데이터를 제공할 수 있다. 이 결과는 향후 설계단계에서 BIPV 시스템의 적용 여부와 세부 설계에서 효과적으로 활용할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 BIPV 시스템의 설계 단계에서 설계요소에 대한 태양광 발전성능 분석을 기존대비 효과적으로 수행하고 그 결과를 BIPV 경제성 평가와 적용여부에 대한 의사결정에 판단근거로 활용하기 위해, 목업 실증에서 발전성능 데이터를 1년 동안 수집하여 설계요소들의 발전성능 분석을 수행하였으며, 통계적인 방법을 활용하여 설계요소들 간의 관계를 분석하였다. 또한, 수집되는 데이터들의 유효성을 통계방법을 활용하여 검증하였으며, 일사량에 따른 발전성능을 건축적으로 해석할 수 있는 영향인자를 도출하고 분석하였다. 본 논문의 주요결과는 다음과 같다.

1. BIPV 시스템의 목업 실증 시험동에 구축되어있는 모니터링 시스템을 통하여 1년 동안의 설계요소 (모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)에 대한 발전량과 일사량 데이터를 수집하였으며, 통계 프로그램인 미니탭(Minitab)의 정규성 시험, 분산분석을 통하여 데이터의 정규성, 독립성, 등분산성을 분석한 결과, 모든 데이터들이 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 이상으로 정규성을 가지는 것으로 분석되었으며, 분산분석 결과, 신뢰구간 95%이내에서 유의확률(P-value)이 0.05 미만으로 등분산성과 독립성을 가지는 것으로 분석되었다. 통계적인 분석결과, 데이터의 유효성을 분석하고 검증하였다.
2. 일사량에 따른 발전성능을 건축적으로 해석할 수 있는 영향인자를 상관분석을 통하여 도출하고 분석한 결과, 결정질 실리콘 모듈이 박막 실리콘 모듈보다 2.5배 크게 분석되었으며, 결정질 실리콘 모듈의 경우, 남서향(South-West)과 남향(South)

의 설치방향과 30° - 90° 사이의 설치각도에서 영향인자가 높게 나타났으며, 박막 실리콘 모듈의 경우, 남서향(South-West), 남향(South), 남동향(South-East)의 설치방향과 30° - 60° 사이의 설치각도에서 일사량 대비 발전성능의 영향계수 값이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이 결과는 BIPV 시스템의 적용을 고려한 건축 설계에서 음영분석, 설치위치 분석, 등에 활용될 것으로 판단된다.

3. 주요 설계요소(BIPV 모듈의 종류, 설치각도, 설치방향)에 대한 발전성능을 분석하고 통계적인 회귀 분석을 통하여 설계요소와 발전성능 간의 회귀식을 도출하였다. 1년간의 누적발전량 데이터를 주요 효과와 상호작용을 분석한 결과, 결정질 실리콘 모듈이 박막 실리콘 모듈보다 발전성능이 우수한 것으로 분석되며, 설치각도 30°, 15°, 3°, 75°, 90°의 순서대로 발전량이 높게 나타났으며, 설치방향의 경우, 남향, 남서향, 남동향의 발전성능이 높게 나타났으며, 동향, 서향의 경우, 상대적으로 발전성능은 낮게 나타남을 알 수 있다. 설계요소간의 상호작용은 없는 것으로 나타났다. 회귀분석을 통하여 정량적으로 분석한 결과, 발전성능(누적발전량)은 BIPV 모듈에 따라 40 만크의 변동이 있으며, 설치각도에 따라 0.29 만크의 변동이 있고, 설치방향에 따라 0.38 만크의 변동이 되는 것으로 분석되었다.
4. BIPV 모듈종류에 따른 최적의 발전성능이 구현되는 설치각도와 설치방향에 대하여 등고선 분석을 실시한 결과, 결정질 실리콘 모듈은 남서향, 남향, 남동향의 설치방향, 설치각도 15°-45°에서 가장 높은 발전성능을 보이고 있으며, 서향, 동향의 설치방향으로 갈수록, 45°이상의 설치각도로 갈수록 발전성능이 감소되는 것으로 분석되고, 박막 실리콘 모듈은 남향의 설치방향, 설치각도 20°-40°에서 가장 높은 발전성능을 보이고 있으며, 서향, 동향의 설치방향으로 갈수록, 20°-40°의 설치각도에서 멀어질수록 발전성능이 감소되는 것으로 분석된다.

본 논문을 통하여 분석된 결과들은 BIPV 시스템의 설계단계에서 발전성능 분석, 음영분석, 경제성 분석 등의 기초자료로 활용이 될 것으로 사료되며, 또한 설계사와 발주처에서 BIPV 시스템의 적용여부를 합리적으로 판단하는 근거자료가 될 것으로 사료된다.

## References

- [1] IEA PVPS, Snapshot of Global Photovoltaic Markets. 2016.
- [2] Seung-Yun Lee, Ah-Young Lee, "A study on BIPV design process based on the BIM for architects", Journal of the architectural institute of korea planning & design, vol. 33, pp. 49-57, Apr. 2017.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.5659/JAIK\\_PD.2017.33.4.49](http://dx.doi.org/10.5659/JAIK_PD.2017.33.4.49)
- [3] W. Zhaoyu, A. Qian, X. Da, J. Chunanwen, "A Research on Shading and LCOE of Building Integrated Photovoltaic," in Proc. 2011 APPEEC, Wuhan, China, March 25-28, 2011, pp. 1-4.
- [4] T. T. Chow, Z. Qiu, C. Li, "Potential application of "see-through" solar cells in ventilated glazing in Hong Kong," Solar Energy Materials&Solar Cells, vol. 93, pp. 230-238, Oct. 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.002>
- [5] Dong-Su Kim, U-Cheul Shin, Jong-Ho Yoon, "Annual energy yield prediction of building added PV system depending on the installation angle and the location in Korea", KIEAE Journal, vol. 14, pp. 67-74, Feb. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.12813/kieae.2014.14.1.067>
- [6] Jong-Ho Yoon, U-Cheul Shin, Jae-Wan Park, "Software development on power and economic analysis of photovoltaic system for building application", Journal of the korean solar energy society, vol. 28, pp. 1-8, Jan. 2008.
- [7] P. Eiffert, "Guidelines for the Economic Evaluation of Building Integrated Photovoltaic Power Systems." NREL, TP-550-31977, Jan. 2003.
- [8] D. Paul, et al., "Optimization of significant insolation distribution parameters- A new approach towards BIPV system design," Renewable Energy, vol. 35, pp. 2182-2191, Mar. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.026>
- [9] Crystalline silicon terrestrial photovoltaic(PV) module-Design qualification and type approval, IEC 61215, 2005.
- [10] Thin-film terrestrial photovoltaic(PV) module- Design qualification and type approval, IEC 61646, 2008.

이 승 준(Seung-Joon Lee)

[정회원]



- 2014년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 (박사과정)
- 2003년 3월 ~ 2013년 2월 : LG전자 전자기술원 책임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 태양광발전 KS 전문위원회 전문위원

- 2016년 3월 ~ 현재 : IEC TC82 / IECRE 전문위원
- 2016년 3월 ~ 현재 : ISO 전문위원

<관심분야>

건물일체형태양광(BIPV) 시스템, 태양광 발전시스템, 시스템공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), Modeling & Simulation

이 재 천(Jae-Chon Lee)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 공과 대학 전자공학과(공학사)
- 1979년 2월 / 1983년 8월 : KAIST 통신시스템 (석/박사)
- 1984년 9월 ~ 1985년 9월 : 미국 MIT Post Doc 연구원
- 1985년 10월 ~ 1986년 10월 : 미국 Univ. of California 방문연구원

- 1990년 2월 ~ 1991년 2월 : 캐나다 Univ. of Victoria (Victoria, BC) 방문교수
- 2002년 3월 ~ 2003년 2월 : 미국 Stanford Univ. 방문교수
- 1994년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 정교수

<관심분야>

시스템공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), Systems Safety, System T&E, Modeling & Simulation