



# 태양광시스템의 지역별 최적 방향 및 각도 연구: SAM을 활용한 시뮬레이션 사례분석

김진철<sup>1)</sup> · 김경남<sup>1)\*</sup>

## Study on the Regional Differences of Optimal Orientation and Tilt Angle for Photovoltaic Systems: Simulations by a System Advisor Model

Jin Cheol Kim<sup>1)</sup> · Kyung Nam Kim<sup>1)\*</sup>

Received 25 February 2018 Revised 27 March 2018 Accepted 13 April 2018

**ABSTRACT** In Korean practice, the installers apply a 180° orientation angle and 30° tilt angle for the optimal solar array. This study examined whether the optimal combination would be correct in the geological conditions of Korea. In this paper, the power generation of 80 sample sites in Korea with different longitudes and latitudes was calculated using a System Advisor Model. Each sample was simulated with a wide range of azimuth angles (0°-360°) and tilt angles (0°-90°) by a change of each one degree and the relationship between the system (module direction and angle) and the location (latitude and longitude) for the maximum power generation was analyzed. Based on a total of 2,620,800 simulation runs, the optimal ranges were the 176-184° azimuth and 30-36° tilt. In this study, the strong positive relationship between the tilt angle and the latitude and longitude for the optimal power generation was proven.

**Key words** SAM(System Advisor Model), Photovoltaic power optimization(태양광 최적발전), Optimal orientation(최적 방향), Optimal Tilt angle(최적 경사각)

### Nomenclature

$X_i$  : independent variable

$Y_i$  : dependent variable

$\alpha$  : regression coefficient

$\beta$  : regression coefficient

$\epsilon_i$  : error term

a : constant term

b : gradient

$e_i$  : residual

$R^2$  : coefficient of determination

$\bar{X}$  : average of all X value

$\bar{Y}$  : average of all Y value

$\hat{Y}_i$  : Y value of straight line with gradient

### subscript

SAM : system advisor model

NREL : national renewable energy laboratory

SSE : sum of squares for error

SSR : sum of squares for regression

1) Green School, Korea University

\*Corresponding author: i005034@korea.ac.kr

Tel: +82-2-3290-5917

Fax: +82-2-929-2619

SST : sum of squares for total

AEP : annual energy production

## 1. 서론

전 세계적인 기후변화에 의하여 수십 년만의 한파 및 이상기온 등 각국에서는 많은 환경적인 문제에 직면하여 있다. 우리나라도 최근에 발생한 전국적인 한파와 미세먼지 등으로 기후변화 문제를 실감하고 있다. 이에 정부에서는 탈 원전 및 탈 석탄을 선언하고, 2030년까지 신재생에너지의 비중을 총 발전량의 20%까지 달성하겠다는 3020 계획을 발표하였다. 이러한 정부의 정책 목표를 달성하기 위해서는 우리나라 신재생에너지 발전원 중 잠재량이 가장 높고 보급이 용이한 태양광발전사업의 확대가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 국내 태양광 발전소 신규 설치 용량은 2014년부터 세계 10위권 안에 들고 있다.<sup>[1]</sup> 2012년 RPS 제도 발의 이후 2016년 까지 태양광 누적 설치용량은 1,024MW에서 4,519MW로 4.4배 이상 증가하였다.<sup>[1]</sup> 이렇게 최근 국내 태양광 시장은 급격하게 증가하고 있다. 그러나 발전량 극대화를 위한 최적 설계가 태양광시스템 건설에 적용되고 있는 지에 대해서는 검토가 필요하다. 실제 국내 시공 현장에서는 지역의 구분 없이 공식처럼 방위각 180도의 정남향 및 경사각 30도로 태양광시스템을 구축하고 있다. 그런데 과연 한국 지형에서 정남향 및 경사각 30도가 최적 설계일지, 최대의 발전량을 얻는 것은 맞는지에 대한 궁금증에서 본 연구는 시작되었다.

기존 연구사례는 남향일 때 최대의 발전량을 나타낼 것이라는 전제하에 최적 경사각에 대한 연구가 대부분이었다. 특히 국내 일사량 기상정보는 10개소에서 최대 33개소까지 적용하여 분석한 사례가 있었다.<sup>[2,3]</sup> 10년 이내의 일사량 자료를 주로 적용함으로써 제한적 데이터 사용이라는 분석의 한계가 있었다. 2007년 연구에서는 제주도의 최적 모듈 경사각도가 24도로 분석되었다.<sup>[2]</sup> 남향이라는 전제조건과 특정 지역만을 대상으로 하는 한계가 있었다. 또한 주택용으로 한정하거나, 시스템 분석조건을 단순화한 모형이라는 제한이 있었다. 해외 연구사례도 확인하였다. 인도네시아 지역 분석사례의 경우, 지역별로 경사각의 차이가 있

었다. 그러나 분석도시가 3개소였으며 5kW의 소규모 용량, 남향이라는 전제로 한계가 있었다.<sup>[4]</sup> 미국 지역 분석사례의 경우, 모듈의 최적경사각 실험을 하였으나 실측 설비의 한계로 10도 단위로 측정을 하였다.<sup>[5]</sup> 남아프리카 지역 분석사례의 경우, 다른 연구와 달리 모듈의 최적 방위각 및 경사각을 연구하였다.<sup>[6]</sup> 그러나 최적 방위각을 먼저 정해놓은 상태에서 최적 경사각을 분석함으로써, 최대 발전량을 얻는 방위각 및 경사각 분석에는 역시 한계가 있었다. 때문에 새로운 연구를 통하여 기존 연구 결과에 변동이 있을지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단하였다. 결과의 신뢰성을 높이기 위하여, 장기간의 일사량 데이터를 적용시키기로 하였다. 광역시 및 특별시 뿐만 아니라, 지방 주요 시, 군까지 국내 전 지역의 최대한 많은 곳을 대상지역으로 선정하였다. 모듈의 경사각 뿐만 아니라 방위각도 중요한 결정요인으로 판단하여 함께 분석하는 조건으로 구성하였다.

본 논문에서는 태양광 발전사업의 효율적인 보급 확대를 위하여 지역별로 최대 발전량을 얻을 수 있는 모듈의 최적 방향 및 경사각을 제안하고자 한다. 분석결과에 대한 가설은 경위도 증가에 따라 최적 모듈 경사각은 30도 이상으로 상향 조정된다는 것이다. 또한 경위도 증가에 따라 최적 방위각은 180도 이상으로 상향 조정된다는 것이다. 이와 같은 가설은 총 4가지이며 아래 Table 1과 같다.

이를 증명하기 위하여, 미국 NREL에서 개발한 System Advisor Model(SAM)을 통하여 국내 80개 지역의 태양광 발전량을 분석하였다. 최초에는 Solar Advisor Model이라는 명칭으로 개발되었으며 그만큼 태양광 분석에 최적화

Table 1. Hypothesis

Number	Hypothesis
①	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the longitude increase (West → East)
②	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the latitude increase (South → North)
③	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the longitude increase
④	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the latitude increase

되어있다.<sup>[7]</sup> 실제 SAM을 이용한 태양광 이용률 분석결과 는 실제결과와 유사한 신뢰성을 가진다.<sup>[8]</sup> 지역별 발전량 분석 시, 모듈방향 및 경사각을 1도씩 변환시켜 최대 발전 량이 생산되는 방향 및 각도를 산출 하였다. 또한 위도 및 경도 변화에 따른 모듈방향 및 각도의 상관관계를 분석하였 다. 이를 통하여 본 연구는 지역별로 최대 발전량을 생산할 수 있는 모듈의 최적 방향 및 경사각을 제안하고자 한다.

## 2. 방법론

### 2.1 연구 분석 흐름(개요)

전통적인 과학적 연구방법의 대부분은 이론을 검증하는 연역적, 기능적 경향이 있다.<sup>[9]</sup> 이를 도식화 하여, 연구 수 행 과정은 아래 Figure 1과 같이 탐색과 설계, 실행의 세 가지 범주로 나누어 수행하고자 한다. 첫 번째 탐색 단계에 서는 연구 질문과 이에 대한 문헌조사 및 가설 설정을 한다.

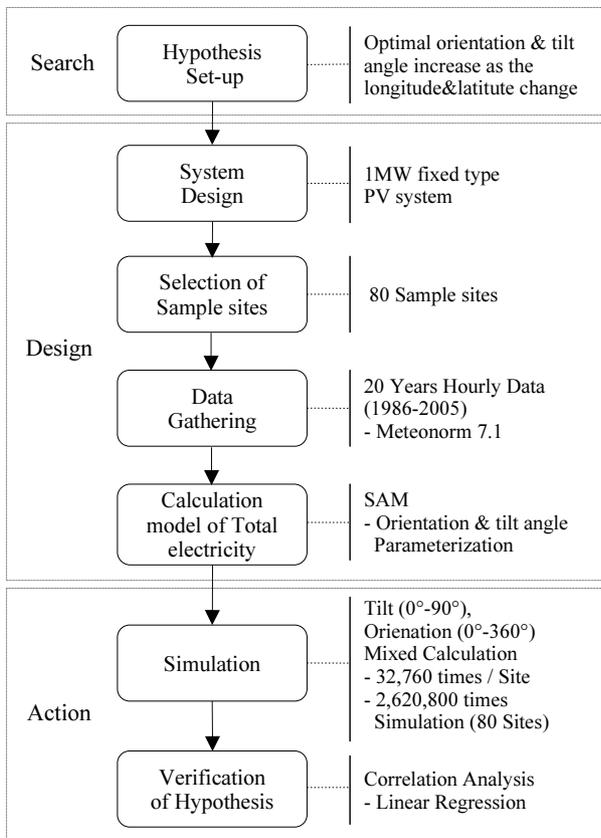


Fig. 1. Research Analysis Flow Chart

두 번째 설계 단계에서는 가설별 분석을 통한 결과 도출을 위하여 시스템구성, 분석 대상지역 선정, 일사량 Data 수집, 발전량 산정 모델을 구성한다. 세 번째 실행 단계에서는 설계 단계를 거친 모델구성에 대하여 SAM을 통한 시뮬레이션을 실시한다. 또한 시뮬레이션 결과에 대하여 선형 회귀분석을 통하여 상관관계 분석을 실시한다. 이를 통하여 가설검증을 하는 것으로 연구 분석을 수행하고자 한다.

SAM모형에서는 Michalsky(1988)가 천문연감(Astronomical Almanac)에서 가져온 태양 위치 계산 알고리즘이 적용된 태양광 방정식을 사용한다.<sup>[10]</sup> 이를 통하여 주어진 시간단계에 대한 태양 각도를 구하고 태양에 비례하는 태양광 어레이의 위치를 정의하는 방법으로 시뮬레이션은 수행된다.<sup>[11]</sup>

### 2.2 분석 시스템의 설계

1MW 고정식 태양광발전소를 건설한다고 가정한다. 개인 및 기업이 투자하는 태양광시스템은 주로 100kW~1MW 까지의 용량이다. 2017년 하반기에 실시되었던 RPS 고정가격계약 경쟁 입찰 사업자 선정결과, 2,260개소 751,685kW의 용량이 접수되어 이중 1,472개소, 251,198kW 용량이 선정되었다. 100kW 미만이 120,448kW로 57%, 3MW 미만이 91,042kW로 43%를 차지하였으며, 3MW 이상은 없었다.<sup>[12]</sup> 이는 중소용량의 보급률이 가장 높다는 것을 알 수 있다. 이중 전기안전관리자의 상주가 필요 없는 1MW 이하로 보급, 확대가 주로 이루어지고 있다.

분석 대상인 1MW 고정식 태양광시스템에는 특정 제조사의 모듈과 인버터를 적용하였다. 모듈은 한화큐셀의 단결정 250W 모듈(모델명: HSL60M6-HA-250TW) 4000장을 설치하는 것으로 계획하였다. 효율은 15.1%이다. 인버터는 SMA 250kW 모델(모델명: SC250U) 4대를 적용하였다. 효율은 96.7%이다. Array는 250병렬 16직렬로 설계하였다. DC Wiring Loss는 2%로 설정하였고 기타 손실은 없는 것으로 가정하였다. 분석시스템의 운영기간은 총 20년이며, 발전 효율은 실제 Non-linear하게 감소될 것으로 보이나, 근래 태양광 발전소의 장기간 운영자료 확보에는 한계가 있어 지난 40년간의 현장 데이터로 분석된 값을 참고하여 매년 0.5%씩 감소되는 것으로 가정하였다.<sup>[13]</sup> 분석결과와 신뢰성을 높이기 위하여 국내의 최대한 많은 지역

Table 2. System Design

Contents	Specification
Capacity	1MW
Module	Hanwha Q Cell HSL60M6-HA-250TW, Mono-crystalline, 250W x 4,000 EA, Normal efficiency 15.1264%
Inverter	SMA SC250U 250kW x 4 EA, Weighted efficiency 96.726%
Array	250 Parallel X 16 Series
Loss	DC Wiring 2%
Degradation	0.5%/year
Operation	20 years

을 대상으로 하여 일사량 데이터를 수집하였다. 현재까지 연구 중 가장 많은 국내 80개 지역을 대상으로 Meteororm 7.1의 일사량데이터를 적용하였다. 지역별로 모듈방향은 0°~360°, 모듈각도는 0°~90°로 각각 1°씩 증가하도록 설정 후 분석을 진행하였다. 모듈방향 및 모듈각도의 경우 수에 따라 각 지역 당 총 32,760회의 경우 수로 시뮬레이션하였다. 80개소의 모든 경우 수에 의하여 총 2,620,800회의 시뮬레이션을 하였기 때문에 상당한 기간이 소요되었다. 본 결과를 토대로 지역별 최대 발전량 구간(DC/kWh)과, 해당 구간의 최적 방위각 및 모듈 경사각을 분석하였다.

### 2.3 데이터

#### 2.3.1 대상지역

일사량 데이터는 국내 전 지역을 대상으로 설정하여 수집하였다. Table 3과 같이 광역시 및 특별시를 포함한 9개의 지역으로 나누어 총 80개 도시를 분석하였다.

국내 행정구역상 시, 군은 광역시 및 특별시를 포함하여 총 157개소이다.<sup>[14]</sup> 국내의 지역별 일사량을 골고루 분석할 수 있도록 이 중 50% 이상의 시, 군을 우선 대상으로 하였다. 우리나라에서 태양광발전소를 설치하기 어려운 주요 산악지형인 백두대간 및 낙동정맥 인근은 제외하였다. 각 위도별로 10개소 이상, 경도별로 20개소 이상을 Target 개소로 설정하여 일사량 데이터를 수집하였으며, 경위도별로 안배한 결과 아래 Figure 2와 같이 총 80개소의 지역이 선정되었다.

Table 3. Target Area

Region	Cities
Seoul, Gyeonggi	Seoul, Incheon, Ansan, Anyang, Gapyeong, Gimpo, Goyang, Gwangju, Hanam, Hwasung, Namyangju, Paju, Pocheon, Pyeongtaek, Seongnam, Suwon, Uijeongbu, Yangpyeong, Yongin
Gangwon	Cheolwon, Chuncheon, Donghae, Gangneung, Sokcho, Hoengseong, Hongcheon, Wonju, Yangyang, Yeongwol
Chungbuk	Cheongju, Chungju, Danyang, Eumseong, Goisan, Jaecheon, Jeungpyeong
Daejeon, Chungnam	Daejeon, Sejong, Asan, Boryeong, Buyeo, Cheonan, Gongju, Hongseong, Nonsan, Yesan
Daegu, Gyeongbuk	Daegu, Andong, Bonghwa, Gumi, Gyungju, Pohang, Yecheon, Yeongcheon
Busan, Gyeongnam	Busan, Ulsan, Changwon, Geochang, Geoje, Jinju, Milyang, Tongyung
Jeonbuk	Gimjae, Gunsan, Iksan, Jeonju, Jinan, Namwon
Gwangju, Jeonnam	Gwangju, Gurye, Gwangyang, Hwasun, Mokpo, Muan, Naju, Suncheon, Yeonggwang, Yeosu
Jeju	Jeju, Seoguipo



Fig. 2. Target Area Position

### 2.3.2 기상데이터

태양광 발전량 분석을 위한 기상데이터는 기울어진 표면 일사량이 필요하다.<sup>[15]</sup> 이는 전일사량(Global Horizontal Irradiance) 및 직달일사량(Direct Normal Irradiance), 방사일사량(Diffuse Horizontal Irradiance)로 구성된다.

Table 4. Irradiance Data (kWh/m<sup>2</sup>/day)

City	Global	Direct	Diffuse	City	Global	Direct	Diffuse
Seoul	3,23	2,18	2,00	Buyeo	3,52	2,39	2,13
Incheon	3,23	2,14	2,02	Cheonan	3,34	2,37	2,00
Ansan	3,24	2,09	2,06	Gongju	3,50	2,59	2,02
Anyang	3,24	2,29	1,96	Hongseong	3,42	2,41	2,04
Gapyeong	3,28	2,40	1,97	Nonsan	3,52	2,65	1,98
Gimpo	3,22	2,10	2,05	Yesan	3,39	2,33	2,06
Goyang	3,22	2,19	1,98	Daegu	3,59	2,76	2,04
Gwangju (Gyeonggi)	3,24	2,27	1,96	Andong	3,71	3,09	1,99
Hanam	3,23	2,32	1,92	Bongwaha	3,57	2,89	1,97
Hwasung	3,24	2,13	2,03	Gumi	3,61	2,80	2,03
Namyangju	3,23	2,29	1,95	Gyeongju	3,57	2,74	2,04
Paju	3,22	2,22	1,97	Pohang	3,61	2,83	2,00
Pocheon	3,23	2,30	1,95	Yecheon	3,61	2,88	1,98
Pyeongtaek	3,28	2,31	1,99	Yeongcheon	3,60	2,82	2,03
Seongnam	3,23	2,32	1,94	Busan	3,60	2,62	2,11
Suwon	3,24	2,21	2,01	Ulsan	3,58	2,68	2,07
Uijeongbu	3,22	2,20	1,98	Changwon	3,59	2,63	2,10
Yangpyeong	3,26	2,23	2,03	Geochang	3,69	3,05	1,98
Yongin	3,24	2,23	1,98	Geoje	3,63	2,69	2,09
Cheolwon	3,41	2,82	1,85	Jinju	3,64	2,74	2,08
Chuncheon	3,34	2,50	1,96	Milyang	3,58	2,72	2,05
Donghae	3,51	2,66	2,04	Tongyeong	3,66	2,65	2,15
Gangneung	3,51	2,77	1,98	Gimje	3,67	2,60	2,15
Hoengseong	3,40	2,60	1,97	Gunsan	3,63	2,63	2,09
Hongcheon	3,38	2,55	1,98	Iksan	3,62	2,54	2,14
Sokcho	3,48	2,75	1,97	Jeonju	3,66	2,82	2,01
Wonju	3,39	2,57	1,96	Jinan	3,64	2,80	2,05
Yangyang	3,53	2,86	1,96	Namwon	3,70	2,99	2,01
Yeongwol	3,49	2,90	1,90	Gwangju	3,83	2,73	2,23
Cheongju	3,48	2,59	2,04	Gurye	3,69	2,79	2,09
Chungju	3,43	2,53	2,02	Gwangyang	3,77	2,97	2,07
Danyang	3,51	2,86	1,94	Hwasun	3,83	2,88	2,14
Eumseong	3,40	2,53	1,97	Mokpo	3,88	2,96	2,12
Goisan	3,46	2,62	2,01	Muan	3,87	3,00	2,10
Jaechon	3,44	2,74	1,91	Naju	3,86	2,84	2,19
Jeungpyeong	3,39	2,43	2,02	Suncheon	3,80	2,98	2,06
Daejeon	3,56	2,68	2,04	Yeonggwang	3,87	2,80	2,19
Sejong	3,47	2,56	2,01	Yeosu	3,82	2,94	2,11
Asan	3,34	2,41	1,98	Jeju	3,75	2,71	2,13
Boryeong	3,49	2,41	2,10	Seogwiipo	3,75	2,81	2,09

기상청은 국내 20개 지역에 일사량 측정값을 공개하고 있으나, 전일사량만을 제공하여 한계가 있다.<sup>[15]</sup> 따라서 80개 지역의 기상데이터는 Meteonorm 7.1에서 제공되는 EPW 파일을 사용하였다.<sup>[16]</sup> 측정 일사량은 1986-2005년 20년간의 Hourly 데이터를 사용하였다. 지역별 평균 일사량 데이터는 Table 4와 같다.

Figure 3은 서울, 경기지역을 시작으로 고위도 지역부터 저위도 지역까지 총 80개 도시의 일사량 Trend를 표시한 그래프이다. 저위도 지역으로 갈수록 일사량은 증가하는 추이를 보인다. Meteonorm 7.1 일사량 데이터의 신뢰성 확인을 위하여, 기상청에서 제공하는 20년 데이터를 비교하였다. 기상청에서는 방사일사량 및 직달일사량은 별도로

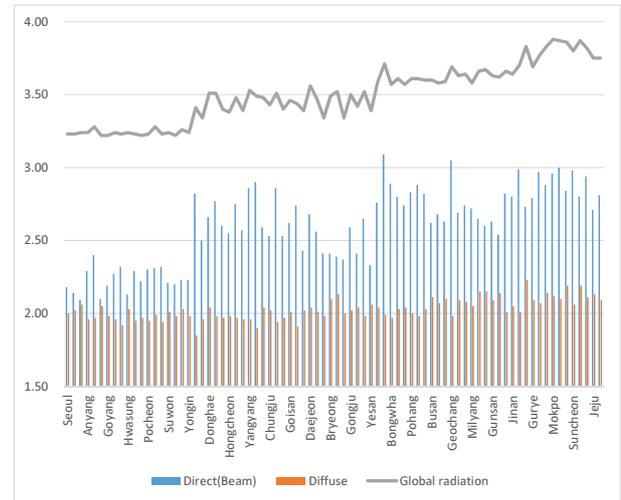


Fig. 3. Irradiance Data Trend by City

Table 5. Comparison of Global Horizontal Irradiance (1986-2005, kWh/m<sup>2</sup>/day)

City	Meteonorm 7.1	Meteorological Administration	Error rate
Seoul	3,23	3,19	1,25%
Suwon	3,24	3,32	2,35%
Chuncheon	3,34	3,41	2,02%
Gangneung	3,51	3,46	1,55%
Cheongju	3,48	3,54	1,82%
Daejeon	3,56	3,61	1,35%
Daegu	3,59	3,58	0,29%
Pohang	3,61	3,58	0,74%
Busan	3,60	3,51	2,45%
Mokpo	3,88	3,89	0,28%

제공하지 않고, 전일사량만을 제공하기 때문에 전국에 고루 분포된 10개 표본지역(서울, 수원, 춘천, 강릉, 청주, 대전, 대구, 포항, 부산, 목포)을 선정하여 동일기간(1986년~2005년)의 전일사량만을 비교하였다. 그 결과 Table 5와 같이 0.28%에서 최대 2.45%의 오차율을 나타내었다. 10개 표본지역은 모두 3% 이내의 오차율을 나타내어 데이터가 대부분 일치하고 있음을 알 수 있었다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 지역별 최적 방위각 및 모듈각도

SAM을 이용하여 80개 지역의 방위각 및 모듈각도를 1도씩 변화시키며 발전량을 분석하였다. 먼저 1개 표본(강릉)의 각도 조합에 따른 태양광발전량 변화 추이는 Figure 4와 같다. 최대발전량은 1,409,890kWh/yr(DC)(방위각 182도, 경사각 36도), 최소발전량은 393,163kWh/yr(DC)(방위각 0도, 경사각 90도)이며, 1도씩 방위각/경사각 각도 변화에 따른 발전량 산출 조합 32,760개의 평균은 1,009,948kWh/yr(DC)이다. 80개 지역별로 발전량이 최대가 되는 방위각 및 모듈각도는 Table 6과 같다.

분석결과 지역별로 최대 발전량을 얻을 수 있는 방위각 및 모듈각도는 건설현장에서 공식처럼적용하는 정남향, 경

사각 30도와 상이하였다. Table 6과 같이 지역별로 편차를 보였다. 발전량이 최대가 되는 방위각은 176도(남동향)~184도(남서향), 모듈각도는 30도~36도의 추이를 나타내었다. 따라서 정남향/30도에서 최대 발전량은 나타내는 지역은 한 곳도 없었다.

#### 3.2 가설에 대한 검정

가설에 대한 검정을 위하여 선형 회귀 분석(Linear Regression)을 통해 상관관계를 분석하였다. 선형 회귀 모델(Linear Regression Model)에서 영향을 주게 되는 독립변수  $X$ 는 위도와 경도로 하고 영향을 받게 되는 종속변수  $Y$ 는 독립변수  $X$ 에 따라 변하는 방위각 및 모듈의 각도로 설정 하였다. 4가지 가설 검정을 위해 독립변수  $X$ 와 종속변수  $Y$ 는 각 1개로 단변량 단순 선형 회귀 모델로 분석하였다. 독립변수  $X$ 가 종속변수  $Y$ 에 끼치는 영향력을 나타내는 식은 아래와 같다.

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i \quad (1)$$

$i$ 는 전체 개체수를 나타내며, 국내 전 지역의 80개소를 분석하였으므로 80회를 계산하였다. 개체 80개에 의하여 측정된 변수  $X$ 와  $Y$ 의 실제 측정된 값  $X_i$ 와  $Y_i$ 를 2차원 좌표 상에 점  $b$ 들로 나타낸다. 이후  $X$ 와  $Y$ 의 관계

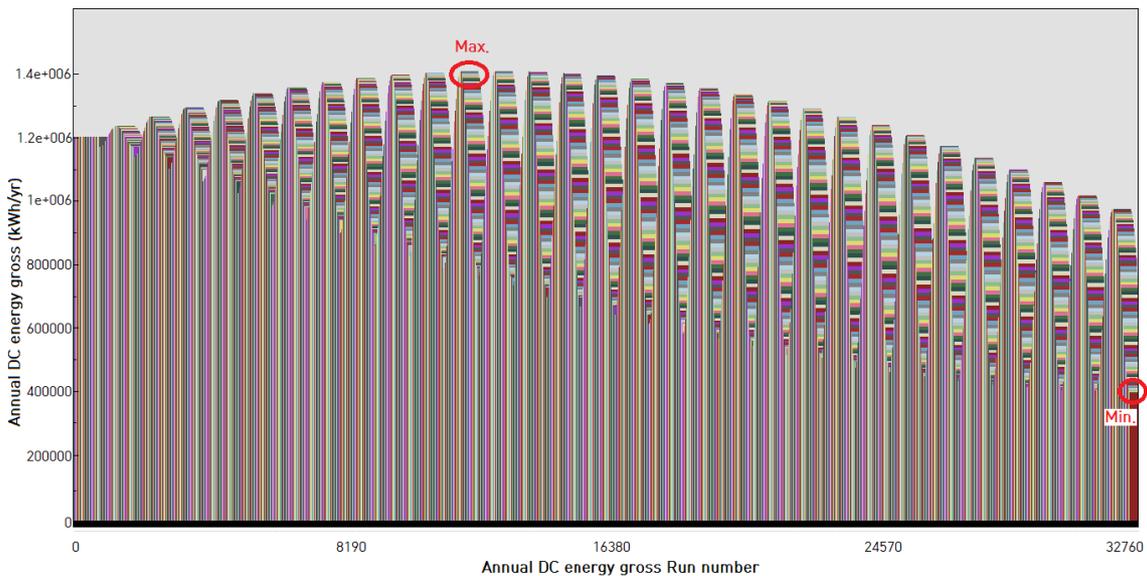


Fig. 4. AEP Gross (DC/kWh) of 32,760 Cases in Gangneung

Table 6. Optimal Orientation and Tilt angle

City	Orien-tation	Tilt angle	City	Orien-tation	Tilt angle
Seoul	180°	33°	Buyeo	179°	32°
Incheon	180°	33°	Cheonan	179°	33°
Ansan	178°	32°	Gongju	176°	32°
Anyang	181°	34°	Hongseong	181°	32°
Gapyeong	181°	35°	Nonsan	180°	32°
Gimpo	179°	33°	Yesan	182°	32°
Goyang	181°	35°	Daegu	179°	34°
Gwangju (Gyeonggi)	178°	33°	Andong	179°	36°
Hanam	179°	33°	Bongwaha	180°	35°
Hwasung	179°	32°	Gumi	179°	34°
Namyangju	181°	34°	Gyeongju	178°	35°
Paju	178°	34°	Pohang	179°	34°
Pocheon	183°	34°	Yecheon	178°	35°
Pyeongtaek	182°	33°	Yeongcheon	179°	35°
Seongnam	179°	33°	Busan	179°	34°
Suwon	178°	32°	Ulsan	180°	34°
Uijeongbu	181°	33°	Changwon	180°	33°
Yangpyeong	178°	33°	Geochang	179°	35°
Yongin	178°	32°	Geoje	177°	33°
Cheolwon	182°	35°	Jinju	179°	33°
Chuncheon	181°	35°	Milyang	179°	34°
Donghae	179°	36°	Tongyeong	177°	33°
Gangneung	182°	36°	Gimje	178°	31°
Hoengseong	178°	35°	Gunsan	179°	31°
Hongcheon	178°	35°	Iksan	180°	31°
Sokcho	182°	36°	Jeonju	181°	32°
Wonju	179°	34°	Jinan	179°	33°
Yangyang	180°	36°	Namwon	179°	34°
Yeongwol	178°	36°	Gwangju	179°	31°
Cheongju	178°	34°	Gurye	179°	32°
Chungju	181°	34°	Gwangyang	179°	33°
Danyang	183°	35°	Hwasun	180°	32°
Eumseong	179°	33°	Mokpo	180°	31°
Goisan	179°	34°	Muan	181°	32°
Jaechon	176°	34°	Naju	180°	31°
Jeung pyeong	177°	33°	Suncheon	181°	33°
Daejeon	178°	33°	Yeonggwang	184°	31°
Sejong	179°	33°	Yeosu	178°	33°
Asan	178°	33°	Jeju	176°	30°
Boryeong	180°	32°	Seoguiipo	177°	30°

를 제일 잘 보여주는 직선을 함수형태로 나타내면 아래의 식과 같다.

$$Y = a + bX \quad (2)$$

오차  $SSE$ 를 최소화하기 위한  $a$ 와  $b$ 를 계산하기 위하여 최소 자승법(Least squared method)을 이용하며, 그 결과  $a$ 와  $b$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (6)$$

상기 선형 회귀 모델의 함수를 이용하여 각각의 독립 변수  $X_i$ 에 대응하게 되는 회귀 계수(Regression coefficient)  $a$ 와  $b$ 를 계산한 결과는 아래 Table 7과 같다.

각 독립변수에 대응되는 회귀 계수를 추정한 결과는 다음과 같다. 가설① 및 가설②, 가설④에서 기울기가 양수로 독립변수가 증가할수록 종속변수도 함께 증가하는 비례관계를 보여 가설이 회귀식으로 설명될 수 있다는 것이 증명

Table 7. Regression coefficient for hypothesis

Number	Hypothesis	Regression coefficient
①	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the longitude increase	$Y = 31.39 + 0.0471X$
②	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the latitude increase	$Y = 31.96 + 0.0331X$
③	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the longitude increase	$Y = 179.67 - 0.0075X$
④	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the latitude increase	$Y = 178.65 + 0.0177X$

되었다. 가설③의 경우는 기울기가 음수로 나타나 반비례 관계를 보였으므로 가설을 회귀식으로 설명할 수 없는 것으로 나타났다. 그러나 회귀계수만으로 가설의 적합성 여부를 확인할 수는 없으므로 아래와 같이 결정계수  $R^2$  계산을 통하여 가설을 검증하였다.<sup>[17]</sup>

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \tag{7}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \tag{8}$$

$$SST = SSR + SSE \tag{9}$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{10}$$

아래 Table 8과 같이 결정계수 계산 결과 가설 4가지 중 가설①이 0.55로 4가지 가설 중 가장 적합한 것으로 나타났다. 즉, 최대 발전량을 얻기 위하여 경도 증가(서→동)에 따라 모듈의 경사각도 증가한다는 것을 알 수 있다.

각 가설별로 그래프를 통한 회귀식의 적합성을 확인하였다. 상기 Figure 5의 경우 가설①을 나타내는 그래프이다. 기울기가 0.0471로 양의 값을 가지며  $R^2$  값이 0.5539로 4가지 가설 중 가장 회귀식에 근접하였다.

아래 Figure 6의 경우 가설②를 나타내는 그래프이다. 기울기가 0.0331로 양의 값을 가진다. 회귀식의 적합성은  $R^2$  값이 0.2732로 가설①과는 차이가 나타났다.

Table 8. R-square for hypothesis

Number	Hypothesis	R-square
①	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the longitude increase	0.5539
②	Optimal tilt angle for PV systems is increased more than 30° according to the latitude increase	0.2732
③	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the longitude increase	0.0117
④	Optimal orientation angle for PV systems is increased more than 180° according to the latitude increase	0.0646

가설①의 결과를 나타내는 Figure 5의 그래프에 비해 가설②의 결과를 나타내는 Figure 6에서 각 점들과 직선과의 거리인 잔차  $e_i$ 가 현저하게 높다는 것을 알 수 있다. 이는 가설②에서의  $R^2$  값 회귀식 근접도가 낮아져 독립변수와 종속변수 간 상관관계가 가설①보다 상대적으로 낮아짐을 의미한다. 그러나 동 수치 0.2732는 여전히 유의미한 수치인바, 가설②가 통계적으로 유의함이 증명된다. Table 9는 회귀식에 근접하는 기여율 지표를 보여주고 있다.<sup>[18]</sup> 기여율 지표에 따라 가설①, ②는 독립변수와 종속변수의 상관관계가 높다고 볼 수 있다.

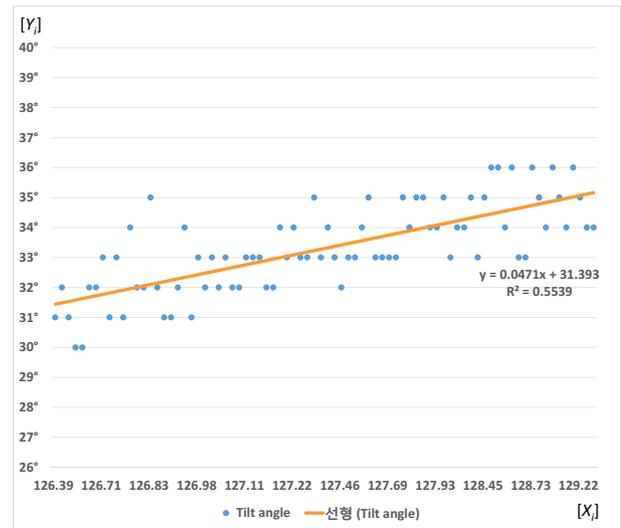


Fig. 5. Optimal PV Tilt Trend by Longitude

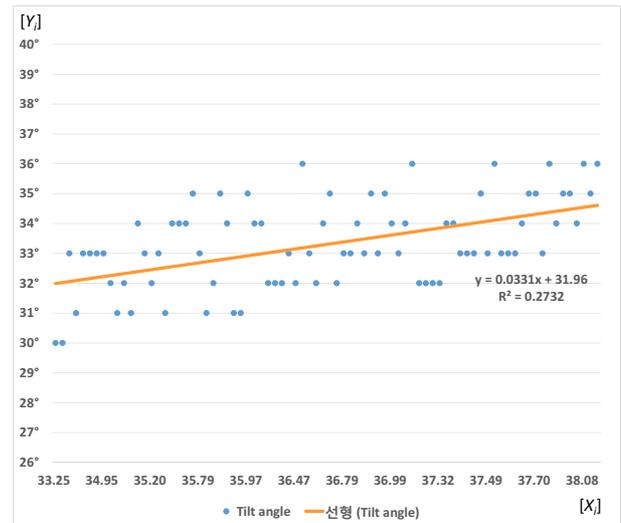


Fig. 6. Optimal PV Tilt Trend by Latitude

Table 9. Contribution of R-square

Contribution rate	Coefficient of determination	Applicable Hypothesis
Large	$0.26 \leq R^2$	Hypothesis ①, ②
Middle	$0.13 \leq R^2 < 0.26$	
Small	$0.02 \leq R^2 < 0.13$	Hypothesis ④

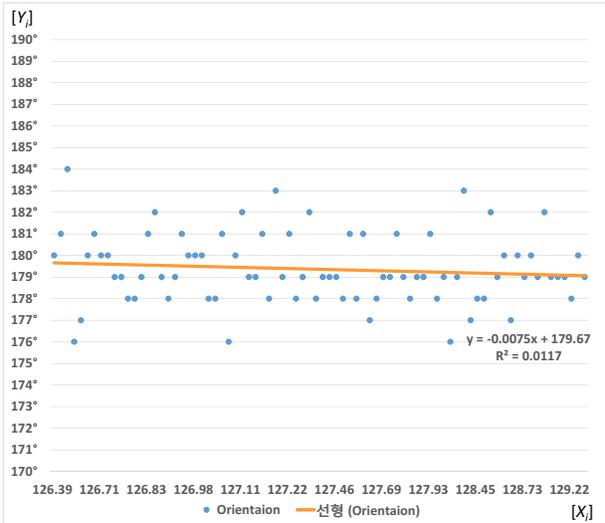


Fig. 7. Optimal Orientation Trend by Longitude

Figure 7의 경우 가설③을 나타내는 그래프이다. 기울기가  $-0.0075$ 로 음의 값을 가진다. 이는 경도가 증가함에 따라 모듈의 방향 기울기가 양의 값을 가진다는 가설과 대립하므로 가설이 적합하지 않음을 알 수 있다.  $R^2$ 값도 0.0117로 회귀식에 근접하지 않았다. 기여율지표에서도 Small 미만으로 나타나 독립변수와 종속변수간의 상관관계가 없었다.

Figure 8의 경우 가설④를 나타내는 그래프이다. 기울기가 0.0177로 양의 값을 가진다. 그러나  $R^2$ 값이 0.0646으로 0에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이 경우 회귀식에 의한 직선이 종속변수  $Y_i$  분포를 적합하게 설명하지 못하고 있다는 것을 의미한다. 기여율 지표에서도 기여율이 Small로 낮아 독립변수와 종속변수간의 상관관계가 부족함을 알 수 있다.

4가지 가설 그래프를 통하여 회귀식에 의한 직선 및 종속변수를 분석한 결과 가설①, ②, ④는 양의 기울기를 가진다는 것을 알 수 있었다. 가설 검정을 위하여 결정계수인  $R^2$  계산결과 가설①은 회귀식에 가장 근접하는 높은 수치

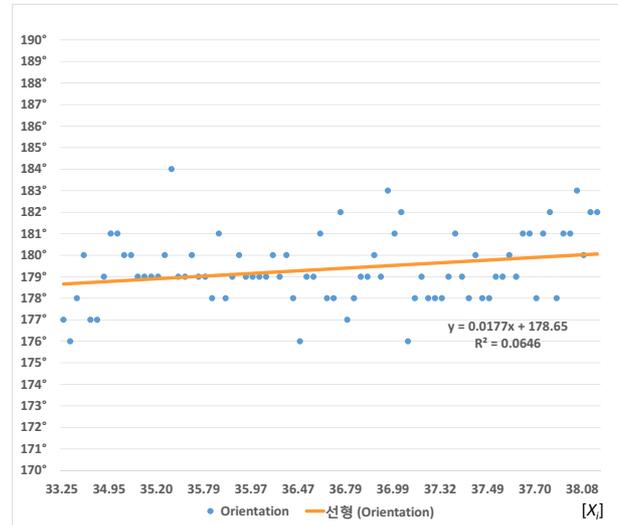


Fig. 8. Optimal Orientation Trend by Latitude

를 보여 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 가설②는 상관관계는 있었으나 조금 낮은 수치를 나타내었다. 가설④는 회귀식에 근접하는 수치를 나타내지 않아 상관관계가 부족한 것으로 나타났다. 결론적으로 가설①과 가설②만이 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 이는 경위도 증가에 따라 모듈 방위각의 증감은 관련이 없으며, 모듈각도만 증가하는 상관관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 분석 결과에 대한 해석

가설①과 가설②의 가설검정을 통하여 경위도에 따른 상관관계는 모듈 각도만이 관계가 있는 것으로 나타났다. Figure 9는 국내 80개 지역에서 최대 발전량을 얻을 수 있는 최적 방위각 및 모듈 경사각을 보여주고 있다. 경위도가 낮을 때 모듈 경사각도 낮고, 경위도가 높아질수록 모듈 경사각이 높아지는 추이를 보이고 있다. 이를 좀 더 용이하게 확인 할 수 있도록 해당 지역별로 최적 모듈 경사각 ( $30^\circ \sim 36^\circ$ )이 같은 경우에는 같은 색깔로 표현하였다. 기존 이론으로는 남중고도의 차이 때문에 위도에 따라 모듈의 최적 경사각이 달라지는 것(가설②)은 이해가 된다. 그러나 경도에 따라 최적 경사각이 달라지는 것(가설①)은 어떻게 해석할 수 있을까. 상기 3.2에서 가설①이 가설②보다 더 유의하다는 분석결과도 도출되었다. 그 설명은 한국 지형이 동고서저의 형상이기 때문일 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위해 방위각은 180도로 고정된 상태로 서울지역 및



Fig. 9. Optimal Orientation and Tilt of PV

강릉지역의 경사각을 위도로 설정한 후(Tilt=Latitude) 발전량을 분석하였다. 이를 3.1에서 분석한 1도씩 방위각/경사각 각도 변화에 따른 발전량 산출 조합 32,760개의 발전량과 비교하여 가장 근접한 발전량의 경사각을 확인한 결과 서울은 29도, 강릉은 34도로 분석되어 동高서低의 형상에 따라 모듈의 최적 경사각이 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 경위도 증가에 따라 모듈각도가 비례하여 높아지는 것이 아니고 기울어진 추세를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 지구의 자전축이 23.5도로 기울어져 있는 만큼 비례하여 기울어진 추세를 보이는 것으로 사료된다.

Table 10은 정남향/30도 경사각과 연구에서 산출된 최적 방위각/경사각 간의 발전량 차이를 보여준다. 국내 80개 대상 지역에서 동일한 1MW 고정식 태양광시스템의 20년간 발전량 증가율 수치이다. 5% 이상 증가한 지역이 총 13개 지역이며, 최대 9.2%까지 증가하였다. 주목할 만한 점은, 가설①과 가설②에서 검정된 상관관계 결과에 따라

Table 10. AEP growth (DC/kWh, 20 years)

Region	City	AEP growth	Region	City	AEP growth
Seoul, Gyeonggi	Seoul	2.5%	Daejeon, Chungnam	Buyeo	0.9%
	Incheon	1.4%		Cheonan	1.5%
	Ansan	1.5%		Gongju	1.9%
	Anyang	3.1%		Hongseong	1.1%
	Gapyeong	4.8%		Nonsan	0.7%
	Gimpo	1.5%		Yesan	1.4%
	Goyang	2.6%	Daegu	3.6%	
	Gwangju (Gyeonggi)	2.1%	Andong	7.4%	
	Hanam	2.5%	Bongwha	5.1%	
	Hwasung	0.9%	Gumi	3.8%	
	Namyangju	2.8%	Gyeongju	4.7%	
	Paju	2.9%	Pohang	3.5%	
	Pocheon	3.3%	Yecheon	5.1%	
	Pyeongtaek	1.8%	Yeongcheon	5.0%	
	Seongnam	2.2%	Busan, Gyeongnam	Busan	2.8%
	Suwon	1.3%		Ulsan	3.1%
	Uijeongbu	1.6%		Changwon	2.4%
	Yangpyeong	2.1%		Geochang	5.3%
	Yongin	1.4%		Geoje	2.3%
Cheolwon	6.3%	Jinju		2.5%	
Gangwon	Chuncheon	4.8%	Milyang	3.3%	
	Donghae	7.4%	Tongyeong	2.5%	
	Gangneung	7.6%	Gimje	0.5%	
	Hoengseong	4.8%	Gunsan	0.5%	
	Hongcheon	5.6%	Iksan	0.2%	
	Sokcho	8.2%	Jeonju	0.8%	
	Wonju	4.3%	Jinan	1.8%	
	Yangyang	9.2%	Namwon	3.0%	
	Yeongwol	7.6%	Gwangju	0.4%	
	Chungbuk	Cheongju	3.8%	Gurye	1.1%
Chungju		2.9%	Gwangyang	2.4%	
Danyang		6.5%	Hwasun	1.1%	
Eumseong		2.2%	Mokpo	0.4%	
Goisan		4.5%	Muan	0.9%	
Jaechon		4.8%	Naju	0.4%	
Jeungpyeong		1.9%	Suncheon	1.9%	
Daejeon, Chungnam	Daejeon	2.1%	Yeonggwang	1.1%	
	Sejong	2.3%	Yeosu	1.9%	
	Asan	1.7%	Jeju	0.7%	
Boryeong	0.8%	Seouipo	0.2%		

경위도가 높은 강원지역 및 대구, 경북지역에서 모듈 최적각도 적용에 의하여 5%이상 발전량이 증가하였다. 즉, 경위도가 낮은 지역은 모듈의 최적각도가 기존에 일반적으로

적용되고 있는 30도에서 크게 차이가 나지 않아 발전량이 높게 증가하지 않았다. 그러나 경위도가 높은 강원지역 및 대구, 경북지역은 모듈의 최적각도가 기존의 30도에서 5~6도로 높아져 크게 차이가 났다. 때문에 모듈의 최적 각도 적용 시 경위도가 낮은 지역보다 발전량 증가 폭이 더 높았던 것으로 보인다. 이는, 방위각, 경사각을 고려한 시스템 설계가 특히 동쪽 지역인 강원지역 및 대구, 경북지역에서 더욱 중요하다는 것을 의미한다.

근래, 일사량이 우수한 전라남도 및 전라북도 지역에 태양광 설치가 집중되어 연계 전력계통의 부족현상이 일어나고 있다. 이에 정부에서는 접속용량 부족으로 대기 중인 신재생에너지 사업자들을 위해 “1MW 이하 소규모 신재생 계통접속 보장” 정책을 시행하기도 하였다.<sup>[19]</sup> 그럼에도 불구하고 변압기당 접속용량의 한계로, 변전설비 확충 없이는 계통접속을 100% 보장할 수 없는 실정이다. 때문에 일사량이 조금 부족하더라도 전력계통 잔여용량이 풍부한 강원도 및 경상북도로 태양광 설치가 증가하고 있는 추세이다. 그러므로 본 논문에서 제시된 지역별 최적 방위각 및 모듈각도를 해당지역에 적용할 수 있다면 이용률 향상 및 경제성 제고에 반드시 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

태양광 시스템 설계 시에 방위각과 모듈 경사각 결정은 발전량에 영향을 준다. 더 나아가 태양광시스템의 경제성에 지대한 영향을 미친다. 때문에 최적 발전량 산출을 위한 방위각과 모듈경사각 결정에 대한 최적설계가 필요하다는 것이 본 논문을 통하여 증명되었다. 특히, 경위도가 높은 강원도 및 경상북도 지역에서 모듈의 최적 경사각 적용시의 발전량 증대효과가 더욱 높은 것으로 나타났다. 최근 상대적으로 전력계통 연계 용량이 충분한 강원도 및 경상북도 지역으로 태양광 설치 사례가 늘어나고 있는 추세인 바, 본 논문은 해당지역 현장의 태양광 시스템 시공을 하는데 있어 충분히 의미를 가지게 될 것으로 사료된다. 또한 우리나라는 파리협약에서 발표한 온실가스 감축량 37% 중 해외에서 감축해야 하는 양이 11.3%로 상당히 많은 감축량 확보가 필요한 상태이다. 우리나라보다 면적이 넓고 일사량이

좋은 해외에서 태양광 발전사업 진행 시 경위도 차이에 따라 최적 방위각 및 모듈 각도의 차이가 우리나라보다 더 클 것으로 사료된다. 때문에 해외 태양광 사업 검토 시 본 논문에서 연구된 최적 방위각 및 모듈각도에 대한 방법론 및 지역별 분석이 선행된다면 온실가스 감축량을 확보하는데 더욱 도움이 될 것으로 사료된다. 향후 해외의 고일사량 국가들에 대한 후속연구를 기대해 본다.

#### 감사의 글

본 연구는 KU-KIST 그린스쿨 운영지원사업의 지원을 받았으며, 에너지기술평가원의 산업혁신 기술사업(2015010130310)의 연구비를 지원 받아 수행되었습니다.

#### References

- [1] Jae-Hong Seo, 2017, “Solar Energy Market Briefing in Korea” Korea Energy Economics Institute, Korea Energy Demand Brief, Series No. 4-5, 1-2.
- [2] Gwon-Jong Yu, Yo-Han Lee, Jung-Hun So, Se-Jin Seong, Byung-Gyu Yu, 2007, “The Study on Optimum Installation angle of Photovoltaic Arrays using the Expert System”, Journal of the Korean Solar Energy Society, 27(3), 107-115.
- [3] Se-Kyung Oh, Pyeong-Chan Lhm, Kyung-Hee Lee, 2012, “Optimal Electric Generation for Fixed-Type Photovoltaic System Installed for Residential Building in Korea”, GRI(Gyeonggi Research Institute) REVIEW 14(2), 271-288.
- [4] Aiman Setiawan, Eko Adhi Setiawan, 2017, “Optimization of a Photovoltaic Power Plant in Indonesia with Proper Tilt Angle and Photovoltaic Type using a System Advisor Model”, International Journal of Technology Volume 8, Issue 3, 539-548.
- [5] Hamed Pourgharibshahi, Morteza Abdolzadeh, and Roohollah Fadaeinedjad, 2014, “Verification of Computational Optimum Tilt Angles of a Photovoltaic Module Using an Experimental Photovoltaic System”, American

- Institute of Chemical Engineers Environ Prog, 34, 1156-1165.
- [6] Tebogo Matshoge, Adoniya Ben Sebitosi, 2011, “Maximum energy azimuth and tilt angles for PV installations in South Africa”, American Institute of energize - Jan/Feb 2011, 61-63.
- [7] Tom Ferguson, Paul Gilman, and Steven Janzou, 2014, “System Advisor Model General Description”, NREL, USA.
- [8] Da-Eun Yun, Yong-Heack Kang, Hyun-Goo Kim, Chang-Yeol Yun, Sang-Nam Lee, Shin-Young, Kim, Hyeong-Dong Park, 2016, “Monthly Degradation Analysis of BIPV System using System Advisor Model(SAM)”, Conference of the Korean Society for New And Renewable Energy May-2016, 296.
- [9] Jaeki Song, Miri Kim, Anol Bhattacharjee, 2014, “Social Science Research: Principles Methods, and Practices”, KOCW Open Access Textbooks.
- [10] Joseph J. Michalsky, 1988, “The Astronomical Almanac’s Algorithm for Approximate Solar Position(1950-2050)”, Solar Energy Volume 40 Issue 3, 227-235.
- [11] Paul Gilman, Aron Dobos, Nicholas DiOrio, Janine Freeman, Steven Janzou, David Ryberg, 2018, “SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update”, NREL, USA, 15-16.
- [12] Renewable Energy Center of Korea Energy Agency, 2017, “Results of the Competitive Bidding of RPS Fixed Price Contracts in the Second Half of 2017”, <http://www.knrec.or.kr/>.
- [13] Dirk C. Jordan and Sarah R. Kurtz, 2012, “Photovoltaic Degradation Rates-An Analytical Review”, NREL, USA.
- [14] Ministry of Government Administration and Home Affairs, 2016, “Administrative Districts and Population Status of Local Authorities”, Publication Registration No. 11-1740000-000069-10, 3-4.
- [15] Hyun-Jin Lee, Shin-Young Kim, Chang-Yeol Yun, 2017, “Generation of Typical Meteorological Year Data Suitable for Solar Energy Systems and Analysis of Solar Irradiance Data”, Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 13, No. 3, pp.24-33.
- [16] Meteornorm 7.1, “Weather Data: Temperature 2000-2009, Radiation 1986-2005”, Meteotest AG, Switzerland.
- [17] Gwang-Bae Park, 2003, “Ananalysis of Variance and Regression Ananalysis”, HAKJISA Publisher Inc., 265-281.
- [18] Il-Hyun Lee, 2016, “Easy Flow Regression Analysis”, HANNARAE Publishing co., 41-53.
- [19] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, “Grid Connection to Small Renewable Power Generation Companies Under 1MW will be faster”, MOTIE Press Release, <http://www.motie.go.kr/>.