

태국 열대몬순기후 조건에서 PV모듈 기술별 성능특성 비교 연구

김승덕*, 고병욱, 박진희, 천대인**

Comparative Study on Performance of Grid-Connected Photovoltaic Modules in Tropical Monsoon Climate under Thailand condition

Seung Duck Kim*, Byung Euk Koh, Jin Hee Park and Dae In Cheon**

Abstract

The performances of three different types of photovoltaic (PV) module technologies namely, copper-indium-diselenide (CIGS), mono-crystalline silicon (mo-Si) and amorphous silicon (a-Si) have been comparatively studied in the grid-connected system for more than a year under the tropical monsoon climate of Thailand. The yields, performance ratios and system efficiencies for the respective PV module technologies have been calculated and a comparison is presented here. The performance ratios of the initial operation year for CIGS showed highest among the compared technologies under Thailand climate conditions by marking 97.0% while 89.6% for a-Si and 81.5% for mo-Si. Although mo-Si has shown highest efficiencies all over the period, under the testing conditions, the operating efficiency of mo-Si was down-graded from its reference value mainly due to high operating temperature and the efficiency of the tested CIGS module was also found as high as that of mo-Si in the study. Accordingly, outdoor assessment shows that CIGS modules have demonstrated high performance in terms of yields and performance ratios in Thailand climate conditions.

Key words

PV Module(태양광모듈), System Performance(시스템성능), Crystalline(결정질), CIGS(구리-인듐-디셀러나이드), a-Si(비정질 실리콘), Tropical Monsoon Climate(열대몬순기후)

(접수일 2014. 8. 27, 수정일 2014. 9. 17, 게재확정일 2014. 9. 17)

* 한국중부발전(주) (Korea Midland Power Co., Ltd.)
■ E-mail : sdkim@komipo.co.kr ■ Tel : (070)7511-1525 ■ Fax : (02)569-0933

** 한국중부발전(주) (Korea Midland Power Co., Ltd.)
■ E-mail : marty1@komipo.co.kr ■ Tel : (070)7511-1523 ■ Fax : (02)569-0933

Nomenclature

I_{sc} : Short circuit current (A)

V_{oc} : Open circuit voltage (V)

τ : measuring period (hour or daily)

PR : Performance Ratio (%)

Y : Yield (kWh/kWp)
 E_r : Output AC energy from the inverter (kWh)
 H_r : total in-plane irradiation (kWh/m²)
 G_{STC} : Reference irradiance at Standard Testing Condition (1 kW/m²)
 η_{sys} : system efficiency (%)

1. 서론

태양광발전은 태양광모듈을 이용해 복사에너지를 직접 전기로 변환시키는 발전 방식으로 지속적인 기술개발과 발전차액지원제도, 설치위치별 가중치 부여 등의 다양한 장려 정책에 힘입어 빠르게 그 수요가 증가하고 있다. 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 다양한 용량의 태양광 발전 프로젝트들이 개발되고 있으며, 이러한 프로젝트의 수익성은 결국 투자비와 직결된 요소인 적절한 설치용량(모듈가격, 부지비용 등) 및 수익을 결정하는 발전량에 의해 좌우되므로 각각의 프로젝트 환경에 적합한 태양광모듈의 선정은 태양광발전 사업자들에게 있어 가장 중요한 문제라고 할 수 있다.

풍부한 일사량으로 태양광발전 개발 잠재성이 높은 태국, 말레이시아 등 고온지역에서는 정부의 정책적인 지원에 힘입어 태양광발전 수요와 투자가 증가하고 있다. 이러한 추세에 따라 열대 몬순기후 지역에서의 PV모듈기술별 성능에 대한 연구가 이뤄졌고,^(1,2) 말레이시아와 같은 열대몬순기후 조건에서는 a-Si 박막형 모듈이 결정질 모듈에 비해 발전량, 성능계수 및 효율에 있어 결정질 모듈에 비해 우수한 것으로 보고 된 바 있다.^(3,4) 하지만 기존의 해외 연구에서도 최근 주목을 받고 있는 CIGS모듈의 성능특성에 대한 대규모 현장시험 연구사례는 매우 드물고, 더욱이 국내 연구는 우리나라 기후 조건에 국한되어 있어 다양한 해외 시장 트렌드와 수요를 반영하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 한국중부발전(주)이 태국에서 개발 및 운영하고 있는 9.7MWp 태양광발전 프로젝트를 대상으로 현장에 설치된 구리-인듐-디셀러나이드(CIGS) 모듈 2종과 비정질 실리콘모듈(a-Si) 모듈 1종 등 3종의 외산 PV모듈과 국산 단결정모듈(mo-Si) 1종에 대해 2013년부터 1년 이상 운영을 통해 획득한 데이터에 근거하여 각각 모듈의 성능특

성을 분석하고 열대몬순기후의 대표적인 기후요소인 외기온도와 일사량간의 상관관계를 분석하였다.

2. 본론

2.1 태국의 기후 특성

본 연구는 태국 Ang Thong주에 위치한(위도 14°40'49" 경도 100°23'20") 9.7MWp 태양광발전 플랜트에서 수행되었다. 이 지역의 기후는 Köppen-Geiger 기후 분류상 열대몬순(Tropical Monsoon) 기후(Aw)로 분류되며, 연평균 기온은 28°C이다. 건기에 해당하는 11월에서 2월말까지는 통상 월평균 기온 18°C-32°C정도이며, 3월 초순에서 5월말은 여름철에 해당되며 4월이 가장 덥다. 6월부터 10월까지는 우기로서 시간 동안 폭우가 계속되기도 한다.⁽⁵⁾ METEONORM 6.01로 추정된 동 지역의 연간 누적일사량은 1,774kWh/m²이며, 일평균 일사량은 4.86kWh/m², 월평균 일사량은 4월에 가장 높은 173.80kWh/m², 8-9월에 가장 낮은 125.10kWh/m²로 나타났다.

2.2 연구의 방법

계통에 연계돼 상업운전을 하는 태양광 플랜트의 경우 다양한 기상조건에서 운전되므로 현장 운전조건하에서 취득한 데이터를 기초로 모듈간의 성능을 비교할 수 있어야 하고, 각 제품의 사양이나 평가기준에 따라 상이한 결과가 도출되지 않도록 동일한 기준으로 정규화한 성능기준을 비교해야 한다. 본 연구에서는 발전량, 일사량 등 데이터는 SCADA 시스템에서 취득한 데이터를 사용하며, 성능평가 요소로서 Yield(Y)와 성능계수(Performance Ratio, PR) 및 시스템 효율(η_{sys})을 분석기준으로 한다.

Yield(Y)는 측정기간(τ) 중 PV어레이의 AC출력 전력량(E_r)을 제작사가 제시한 표준시험조건에서 정격출력(P_{Rated})으로 나눈 값으로 정의되며 식 (1)과 같이 표현된다. 본 연구에서는 1개월 단위로 측정된 Yield(kWh/kWp)를 성능평가 요소로 사용하기로 한다.

$$Y = E_r / P_{Rated} \quad (1)$$

성능계수(PR)는 경사면의 일조량(H_r)에 의해 발생한 시스템의 AC출력 전력량(E_r)을 표준시험조건에서 일사강도(G_{STC} , 1kW/m^2)에서 나타나는 정격출력(P_{Rated})에 대한 비율로 나타낸 값으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$PR = \frac{E_r / H_r}{P_{Rated} / G_{STC}} = \frac{Y}{H_r / G_{STC}} \quad (2)$$

또한 모듈의 시스템 발전효율(η_{sys})은 측정기간(τ) 중 출력 전력량(E_r)을 어레이면의 총 일조량(H_r)과 어레이 면적의 곱으로 나눈 값으로 식 (3)과 같이 표현되며, 여기서 A_a 는 어레이면적으로 그 단위는 m^2 이다.

$$\eta_{sys} = \frac{E_r}{H_r A_a} \quad (3)$$

열대몬순기후는 강한 일사량 및 일사강도, 높은 기온 및 습도, 강우량 등 다양한 기후특성으로 대변되는 만큼 모듈의 성능도 다양한 환경요소들에 의해 영향을 받게 된다. 하지만 장기간에 걸친 실제 운전환경에서는 가장 영향력이 크며 자료 획득이 용이한 대표적인 특성요소로 일반화할 필요가 있다. 본 연구에서는 열대몬순기후를 대표하는 기후 특성요소로 일사량(Irradiation)과 평균기온을 독립변수로 정하고, 상기의 각 성능요소와의 관계를 살펴보기로 한다. 독립변수들과 성능요소와의 관계는 상관계수(Correlation Coefficient) 분석을 통해 상관성을 확인하도록 한다.

2.3 발전시스템 구성 및 개요

본 연구에서는 3개사 4종의 태양광 모듈을 대상으로 2013년부터 7월부터 1년 이상 운영시험을 시행했다. 두 제품(CIGS-A 및 CIGS-B)은 구리-인듐-디셀러나이드(CIGS) 모듈로 동일한 제조사의 제품이다. CIGS모듈은 최근 빠르게 기술개발이 이뤄지고 있는 기술로 박막형모듈 중 가장 높은 효율 잠재성이 있어 큰 기대를 모으고 있다.⁽⁶⁾ 연구에 사용된 또 다른 모듈은 국산 단결정모듈(mo-Si)과 외산 비정질실리콘(amorphous silicon, a-Si)로 그 세부적인 특성은 Table 1과 같다. 이와

같이 본 연구에서는 현재 태양광모듈 시장을 양분하고 있는 대표적인 모듈기술인 결정질모듈과 박막형 모듈의 성능 특성을 비교하고, 특히 향후 큰 잠재력을 가지고 있는 두 종의 박막형 모듈기술을 채택함으로써 열대 몬순기후 특성 하에서 상업운전 시 각 모듈기술별 성능특성을 비교할 수 있게 하였다.

본 태양광 플랜트의 부지 배치도는 Fig. 1과 같다. 각 모듈

Table 1. 채택된 태양광 모듈의 제품사양 및 성능특성(표준시험조건: 일사량 1000W/m^2 , 셀온도 25°C , Air Mass 1.5조건)

구 분	CIGS-A	CIGS-B	mo-Si	a-Si	
모듈기술	CIGS	CIGS	단결정실리콘	비정질 실리콘	
공칭최대출력(Wp)	155	140	295	135	
공칭최대출력 동작전압(V)	80.0	77.0	37.2	47.0	
공칭최대출력 동작전류(A)	1.95	1.82	8.0	2.88	
P_{max} 오차(%)	+10/-5	+10/-5	+3/-0	+7/-2	
공칭개방전압 (V_{oc} , V)	108.0	109.0	45.1	61.3	
공칭단락전류 (I_{sc} , I)	2.2	2.1	8.4	3.41	
모듈효율(%)	12.6	11.4	15.2	9.6	
온도계수 ($\%/^\circ\text{C}$)	I_{sc}	+0.01	+0.01	+0.052	+0.07
	V_{oc}	-0.30	-0.30	-0.34	-0.30
	P_{max}	-0.31	-0.31	-0.44	-0.24

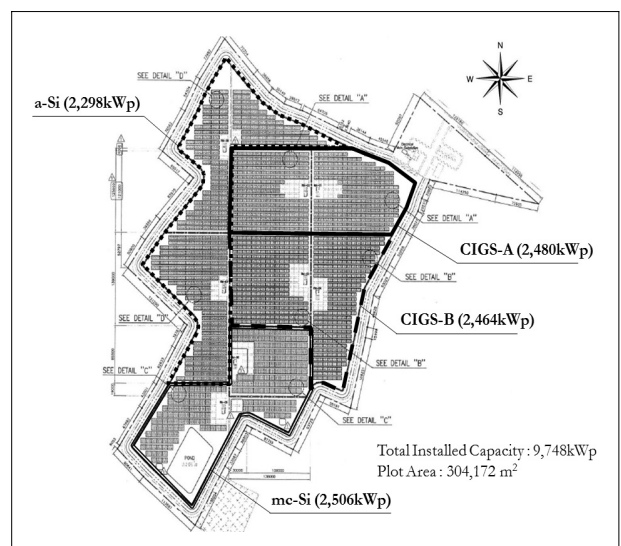


Fig. 1 시암태양광 발전소 부지배치도



Fig. 2 태양광 모듈 설치상태 및 수세정 모습(상) 및 Dust Detection System(하)

Table 2. 발전시스템의 구성 및 설계특성

구분	CIGS-A	CIGS-B	mo-Si	a-Si
어레이 출력(kWp)	1,240 × 2	1,232 × 2	1,253 × 2	1,149 × 2
어레이구성 (1개소)	8p × 1000s	8p × 1100s	18p × 236s	14p × 608s
경사각(°)	15	15	15	15
피치(m)	7.09	7.09	9.93	7.7
GCR*	0.72	0.72	0.80	0.74
모듈수	16,000	17,600	8,496	17,024
모듈면(m ²)	19,618	21,580	16,482	24,202
보증 성능계수	79.8%	77.8%	74.9%	78.9%

* GCR: Ground Coverage Ratio

은 모두 경사고정식으로 정남향이며 지평면으로부터 15도의 경사각을 갖도록 설치했다. 특히, 우기 시 발생할 수 있는 침수피해를 방지하기 위해 모듈, 인버터 등 전기기기는 모두 지상 3.5m 이상의 위치에 설치했다(Fig. 2). 각각의 모듈은 2

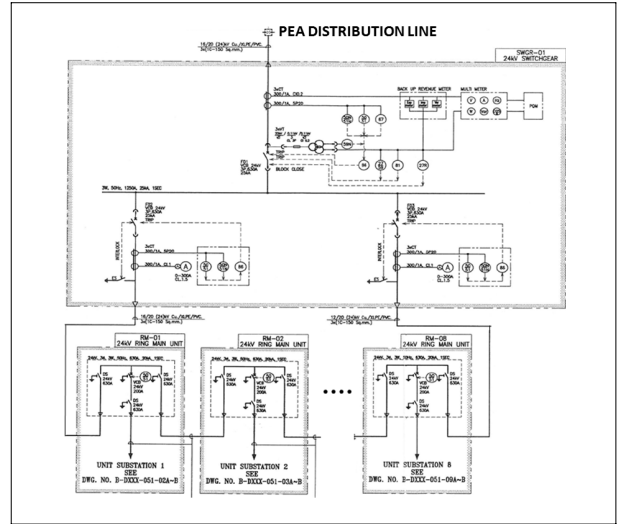


Fig. 3 시스템 단선도(Single Line Diagram)

개 구역으로 나누어 설치되었으며, 각 구역은 AC기준 1MW 용량이 되도록 설계하였다. 시스템의 세부 구성은 Table 2와 같다.

인버터는 Hitachi사의 HIVERTER-NP201i 모델을 채택하였으며, 연속 AC출력은 550kW이고 최대 효율은 98.7%이다.

CIGS-A모듈은 스트링 1,000개, CIGS-B는 스트링 1,100개, mo-Si는 스트링 236개, a-Si는 스트링 608개당 각각 두기의 인버터를 적용하였으며, 감시기능과 운전데이터를 취득할 수 있도록 모니터링 설비 등으로 구성되어 있다.

태양전지 스트링은 병렬로 접속함(junction box)에 연결되며 출력을 부하에 중계하는데 필요한 단자, 역류방지소자, 직류 개폐기 등과 함께 설치되어 인버터로 전달된다. 인버터에서 직류(DC)전력이 300V, 50Hz의 교류전력으로 변환되고, 이어서 변압기에서 배전전력인 22kV로 승압된 뒤 전력 구매계약에 따라 태국 지방전력청(Provincial Electricity Authority, PEA)에 판매된다(Fig. 3).

2.4 결과 및 고찰

2.4.1 Monthly Yield

Fig. 4는 월별일사량과 각 모듈의 Yield를 도시한 그래프이다. 태양광 센서 오류로 2013년 4-6월까지의 기간 중 일사량 데이터가 누락되어 이 기간은 분석대상에서 제외했다. 각 모듈별 연간 Yield 특성을 보면, CIGS-B가 149.7kWh/kWp

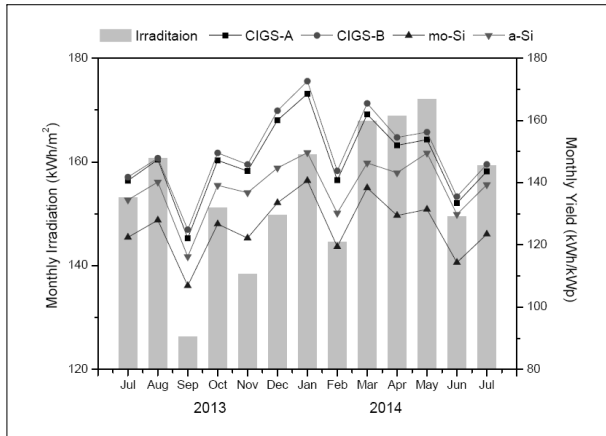


Fig. 4 모듈별 Monthly Yield 및 월누적일사량 그래프

Table 3. 월평균기온(\bar{T}_a)도 및 일평균일사량(\bar{H}_d)과 일평균 Yield(\bar{Y}_d)의 Correlation Coefficient 비교

구 분	$\bar{Y}_{d,CIGS-A}$	$\bar{Y}_{d,CIGS-B}$	$\bar{Y}_{d,mo-Si}$	$\bar{Y}_{d,a-Si}$
\bar{T}_a	-0.290	-0.308	-0.221	-0.011
\bar{H}_d	0.644*	0.622*	0.697**	0.800**

* Pearson Correlation, significant at 0.05 level
 ** Pearson Correlation, significant at 0.01 level

로 가장 높고 그 뒤를 이어 CIGS-A(147.3kWh/kWp), a-Si (138.4kWh/kWp), mo-Si(125kWh/kWp) 순으로 나타났다. 특히 가장 우수한 Yield 성능을 보인 CIGS-B는 a-Si에 비해 8.2%, mo-Si에 비해 19.0% 이상 높은 값을 기록했다.

월별 Yield 특성을 보면 일사량과 Yield간에는 뚜렷한 상관관계가 확인된다. 하지만 일사량과 평균기온이 모두 가장 높은 4-5월 경우 오히려 발전량이 감소하는 것으로 나타나 높은 외기온도와 강한 일사량으로 인해 모듈의 운전온도가 높아져 출력이 감소한 것으로 추정할 수 있다.

월평균기온 및 일평균일사량과 Yield의 상관관계를 분석하면 Table 1과 같다. 여기서 평균외기온도(\bar{T}_a)는 월평균온도를 직접 사용하고, 일평균일사량(\bar{H}_d)은 월별 누적일사량을 해당 월의 역일수로 정규화 했다.

위 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, Yield 특성에는 일평균일사량과 강한 양(+)의 상관관계가 있는 반면에 평균기온과는 대체적으로 음(-)의 관계는 성립하나, 그 뚜렷한 상관관계를 확인하기는 어렵다.

이러한 결과를 기초로 선형회귀분석을 통해 각 모듈별 일

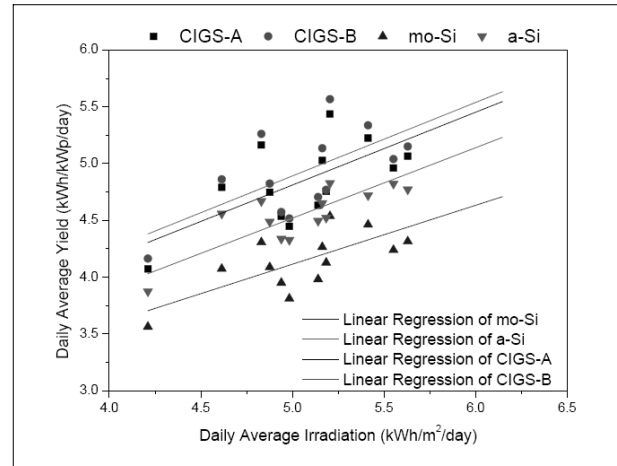


Fig. 5 모듈별 일평균 Yield 및 일평균일사량 관계

평균일사량과(\bar{H}_d)과 일평균 Yield(\bar{Y}_d)의 관계를 도시한 결과(Fig. 5), 동일한 일평균일사량에 대해 CIGS-B의 Yield 성능이 가장 우수하며, mo-Si의 Yield 성능이 가장 낮음을 재확인 할 수 있다.

2.4.2 성능계수(Performance Ratio)

측정 기간 중 각 모듈의 성능계수를 비교한 결과 CIGS-B 모듈이 가장 높은 연평균 97%로 가장 높았고 그 뒤를 이어 CIGS-A 95.4%, a-Si 89.6% 및 mo-Si 81.5%를 기록했다. 가장 높은 성능계수를 기록한 CIGS-B는 a-Si에 비해 약 8.2%, mo-Si에 비해 19% 우수한 평균 성능계수를 보이는 것으로 확인됐다.

성능계수는 제작사의 표준시험조건에서 모듈의 성능 특성을 근거로 하는 정의에 기초한 변수이므로 실제 운전 시 여러 환경요소에 따라 100%를 초과할 수도 있는 값이다. 특히 본 연구에 사용된 CIGS-A 및 CIGS-B모듈의 경우 제작사에서 모듈의 성능은 이미 Light Soaking을 고려한 값이라고 밝힌 바 있지만, 실제 운전출력은 카탈로그 상 값 보다 더 크게 나타나기도 해 Light Soaking 효과가 나타나고 있는 것으로 사료된다. 다만, Light Soaking 효과가 단기적으로는 출력 증가 등 도움이 되는 측면이 있으나 장기적으로 더 빠른 성능 감소 등이 나타날 수 있으므로⁽⁷⁾ 지속적인 운전 데이터 확보를 통해 장주기 성능평가를 시행할 필요가 있다.

각 태양광모듈의 성능계수에도 계절적인 영향이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 평균외기온도(\bar{T}_a)와 일평

균일사량($\overline{H_d}$) 모두 성능계수와 유의미한 음(-)의 상관관계가 있으며, 특히 평균기온도가 성능계수와 강한 상관관계를 가진 것으로 나타나 일사량 증가에 따른 발전량의 증가보다도 외기온도의 상승과 일사량의 상승으로 인한 모듈의 온도 상승으로 인한 효율감소에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

월평균기온이 가장 낮은 12월-1월은 북반구에서 태양의 고도 또한 가장 낮아지는 시기로 인접한 PV어레이간의 차광효과(shading)로 인한 손실이 발생할 가능성이 크다. Table 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 mo-Si모듈은 인접모듈에 의해 차광이 유발되지 않는 한계 태양고도가 42.1°로 CIGS-A 및 CIGS-B모듈의 31.2° 및 a-Si 모듈의 33.9° 보다 커, 본 태양광플랜트의 설계 특성상 다른 모듈에 비해 태양 고도의 모듈영향을 더 받게 된다. 따라서 월평균기온과 태양고도가 가장 낮은 12월에 mo-Si모듈의 성능계수가 다른 모듈에 비해 크게 증가하지 않는 점은 차광에 의한 손실과 차광에 따른 결정질모듈의 성능저하 특성에 기인한 것으로 추정된다.

위의 결과로부터 태국의 열대 몬순기후 조건에서 수행한 각 모듈별 성능계수 비교 평가에서는 CIGS모듈이 가장 우수

한 특성을 보였다. 또한 a-Si 모듈도 mo-Si 모듈에 비해 우수한 성능특성을 보여 열대 몬순기후 조건에서는 CIGS모듈이 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

2.4.3 발전효율(System Efficiency)

Fig. 7은 각 모듈의 월별 시스템 발전효율과 월평균기온을 도시한 그래프이다. 측정기간 중 mo-Si 모듈이 12.45%로 가장 우수한 효율을 보였으며, 이어서 CIGS-A(12.11%), CIGS-B(11.12%), a-Si(8.55%) 순으로 높은 효율을 보여 결정질 실리콘 모듈의 높은 효율 특성을 확인할 수 있다. 특히 본 연구에 사용된 CIGS모듈은 제작사에서 제시한 효율 12.6%(CIGS-A), 11.4%(CIGS-B)에 비해서도 높은 효율을 보여, CIGS모듈은 열대몬순기후의 높은 운전온도 조건에서도 실제로 효율저하가 크지 않은 특성을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 CIGS-A모듈의 경우 1월-2월 중 mo-Si 모듈과 거의 같은 수준의 효율을 보이기도 했는데, 이는 본 태양광 발전사업의 설계적 특성으로 인해 태양고도가 낮아지는 겨울철 인접 PV어레이에 의해 발생하는 차광효과(shading)에 의한 손실이 발생한 것으로 분석되며, 특히 mo-Si모듈은 각 셀이 직렬로 연결되어 있어 차광이 발생하는 경우 박막형 모듈에 비해 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

월평균기온($\overline{T_a}$)과 일평균일사량($\overline{H_d}$)과 모듈 효율의 상관관계를 분석한 결과 모듈의 시스템 효율(η_{sys})은 두 독립변수와 유의미한 음(-)의 상관관계가 있는 것으로 분석되며, 특히 평균기온과 직접적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. Fig.

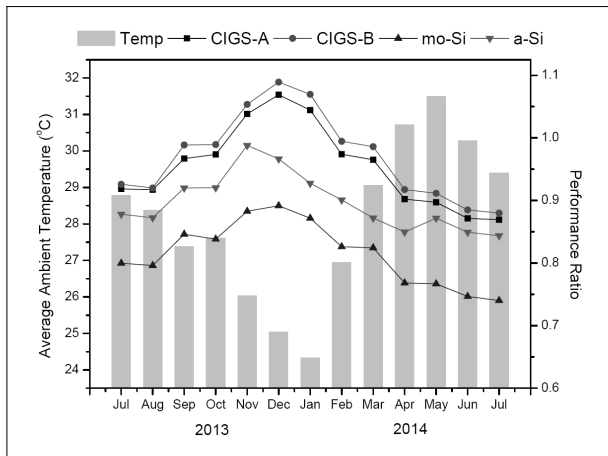


Fig. 6 월별 성능계수 및 월평균기온과의 관계

Table 4. 월평균기온($\overline{T_a}$) 및 일평균일사량($\overline{H_d}$)과 성능계수(PR) 간의 Correlation Coefficient 비교

구 분	PR_{CIGS-A}	PR_{CIGS-B}	PR_{mo-Si}	PR_{a-Si}
$\overline{T_a}$	-0.906*	-0.899*	-0.893*	-0.827*
$\overline{H_d}$	-0.404	-0.394	-0.510	-0.545

* Pearson correlation significant at 0.01 level

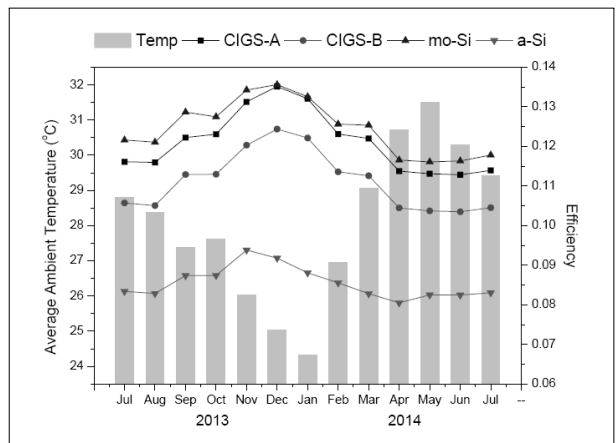


Fig. 7 모듈별 월평균효율 및 월평균기온 관계

8은 월평균기온에 대한 각 모듈의 효율과의 관계를 도시한 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있는 것과 같이 모듈은 선형회귀모델로 유의미하게 설명될 수 있음을 확인할 수 있다. 월평균기온(\bar{T}_a)을 독립변수로 모듈의 평균 효율을 설명하는 선형회귀모델을 개발하고자 하였으나, 모듈의 운전온도(T_{cell})와 모듈효율(η_{cell})의 일반적인 관계식(식 (4))^(8,9)과 형태는 유사하나 온도계수에서 다소 거리가 있어 일사량 등과 같은 다른 요소들까지 고려한 비선형 모델을 고려해야 할 것으로 사료되며, 이는 추후 연구과제로 남겨둔다.

$$\eta_{cell} = \eta_{ref} [1 - \beta(T_{cell} - T_{ref})] \quad (4)$$

앞에서와 같이 태국의 열대 몬순기후 조건에서도 일반적인 결정질모듈의 특성과 같이 mo-Si의 절대효율은 다른 모듈에

비해 높게 나타났다. 하지만 표준시험조건에서의 효율(η_{ref})에 대한 비효율(η/η_{ref})을 확인해 보면 효율성능은 CIGS-B, CIGS-A, a-Si, mo-Si의 순으로 성능계수 비교평가에서와 일관되게 나타나는 것으로 결론지을 수 있다(Fig. 8 하단). 이는 mo-Si 모듈이 우수한 효율특성에도 불구하고 열대몬순기후의 높은 외기온도와 일사량으로 인한 모듈 온도상승으로 인해 효율저하가 크게 나타남을 의미한다. 또한 본 연구결과에서와 같이 CIGS 모듈의 운전효율이 mo-Si의 운전효율과 유사한 수준임을 고려했을 때, 태국의 열대 몬순기후 조건에서는 CIGS모듈의 성능특성이 가장 우수한 것으로 결론지을 수 있다.

3. 결론

2013년부터 태국 Ang Thong 지역에서 상업운전 중인 한국중부발전(주)의 9.7MWp 태양광 발전시스템을 대상으로 상업운전 개시 후 1년간 본 태양광 플랜트에 채택된 CIGS, mo-Si 및 a-Si모듈의 운전 성능 특성을 비교 분석하였다. 분석결과 태국의 열대몬순기후 조건에서, CIGS모듈의 평균 성능계수는 97%를 기록해 mo-Si 모듈의 성능계수 82.3%, a-Si 모듈의 성능계수 90.3%에 각각 19% 및 8.2% 이상 우수한 성능을 보였다. 이와 마찬가지로 CIGS모듈은 Yield에서도 가장 우수한 성능을 보이는 것으로 나타났다.

mo-Si모듈은 비교대상 모듈 중 가장 우수한 효율 성능을 기록했다. 하지만 열대몬순기후 조건의 높은 운전온도로 인해 효율저하가 크게 나타났으며, 이런 효율저하로 인해 CIGS 모듈의 실제 운전효율은 mo-Si의 운전효율에 근접하는 것으로 확인되었다. a-Si도 Yield특성 및 성능계수 특성에서 모두 mo-Si 보다 우수한 것으로 확인되었다.

결론적으로 본 연구를 통해 태국의 열대몬순기후 지역에서는 박막형모듈이 결정계모듈에 비해 우수한 성능 특성을 보이고 있으며, 가장 우수한 성능을 보이는 기술은 CIGS모듈임을 확인할 수 있었다. 다만, 본 연구에 사용된 CIGS 모듈성능은 운전초기 Light Soaking 효과에 영향을 받을 수 있고, 본 연구가 상업운전 개시 후 1년의 기간을 대상으로 한 만큼, 향후에는 각 모듈의 운전특성을 지속적으로 모니터링하여 모듈의 경년열화 특성 및 장기운전에 따른 성능 특성 변화 등에 대한 추가연구를 진행하는 한편, 기후요소들과 성능의 상관관계에 대해 분석할 예정이다.

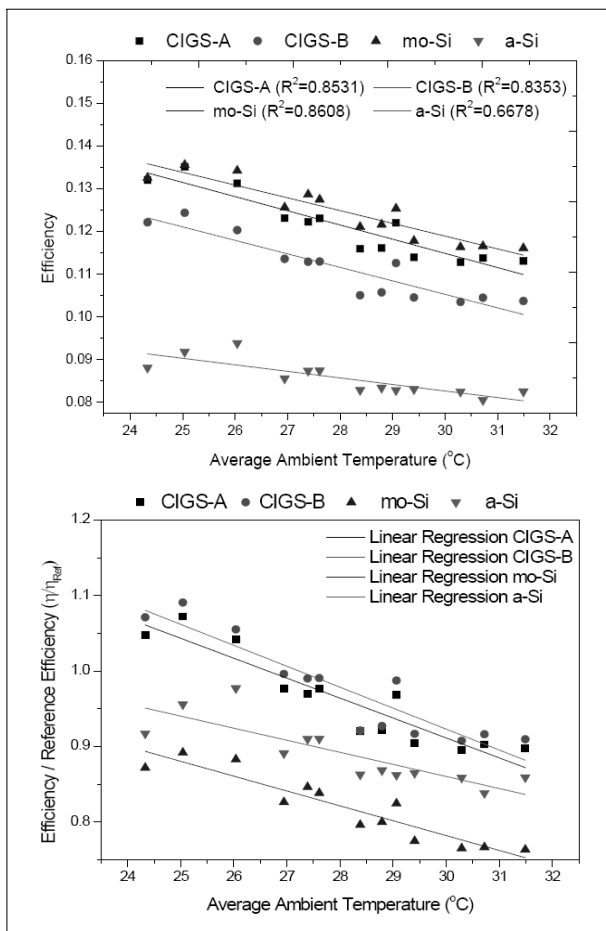


Fig. 8 모듈별 월평균기온과 시스템효율(η_{sys}) 관계(상) 및 시스템효율(η_{sys}/η_{ref})관계 그래프(하)

후 기

본 연구는 한국중부발전(주)의 지원에 의해 이뤄졌으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] A. J. Carr, T. L. Pryor, 2004, "A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates", Solar Energy, Vol. 76, pp. 285–294.
- [2] P. Kamkird, N. Ketjoy, W. Rakwichian, S. Sukchai, 2012, "Investigation on Temperature Coefficients of Three Types Photovoltaic Moduel Technologies under Thailand Operating Condition", Procedia Engineering, Vol. 32. pp. 376–383.
- [3] M. Z. Hussin, A. M. Omar, Z. M. Zain, S. Shaari, 2013, "Performance of Grid-Connected Photovoltaic System in Equatorial Rainforest Fully Humid Climate of Malaysia", International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE), Vol. 2, No. 3, pp. 105–114.
- [4] N. Amon, C, W, Lung, K. Sopian, 2009, "A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia", Renewable Energy, Vol. 34, pp. 1939–1946.
- [5] Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, 2006, "World Map of Koppen-Geiger climate classification updated", Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, pp. 259–263.
- [6] Alasdair Miller, 2012, "Utility Scale Solar Power Plant", International Finance Corporation, pp. 25–28.
- [7] M.Gostein, L. Dunn, 2011, "Light Soaking Effects on Photovoltaic Modules: Overview and Literature Reivew", Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 19–24.
- [8] M.C. Alonso Garcia, J.L. Balenzategui, 2004, "Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Tempterature", Renewable Energy, Vol. 29, pp. 1997–2010.
- [9] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, 2009, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficieny/power correlations", Solar Energy, Vol. 83, pp. 614–624.

김 승 덕



2003년 고려대학교 기계공학과 공학사
2005년 Stanford University 기계공학과
공학석사

현재 한국중부발전 신성장동력실 차장
(E-mail : sdkim@komipo,co.kr)

고 병 욱



2005년 홍익대 기계시스템디자인공학과 공학사
2011년 한양대 플랜트엔지니어링전공 공학석사

현재 한국중부발전 신성장동력실 차장
(E-mail : kohcool@komipo,co.kr)

박 진 희



2003년 고려대학교 기계공학과 공학사
공조냉동기계기술사

현재 에너지관리공단 에너지진단실 과장
(E-mail : jinadany@kemco,or.kr)

천 대 인



1996년 조선대 기계공학과 공학사

현재 한국중부발전 보령화력본부 차장
(E-mail : marty1@komipo,co.kr)