

염전 병행 태양광 발전 시스템 타당성 검토를 위한 기초연구

강성현¹⁾ · 김봉석¹⁾ · 김근호²⁾ · 박종성²⁾ · 김덕성²⁾ · 임철현^{2)*}

¹⁾에너지밸리연구센터, 한국전력연구원, 나주, 58217

²⁾태양에너지연구실, 녹색에너지연구원, 목포, 58656

Feasibility Study of Salt Farm and Solar Power Parallel System

Seong-hyun Kang¹⁾ · Bong-suck Kim¹⁾ · Geun Ho GIM²⁾ · Jongsung Park²⁾ · Deok Sung Kim²⁾ · Cheolhyun Lim^{2)*}

¹⁾Energy Valley R&D Center, Korea Electric Power Research Institute, Naju 58217, Korea

²⁾Solar Energy R&D Department, Green Energy Institute, Mokpo 58656, Korea

Received December 14, 2020; Revised January 14, 2021; Accepted January 14, 2021

ABSTRACT: In this study, the effect of water level and temperature on the power generation was investigated in a water tank with an aquavoltaic PV module to perform feasibility research for the development of salt farm aquavoltaic system. The silicon solar cell attached to the bottom of each water tank is a 1-cell mini module, and the underwater effects of the crystal phase (19.0~19.9% of single- & 17.9~19.9% of poly-crystalline) of the PV module were investigated, and power generation characteristics for water level (0~10 cm) and temperature (10~40°C) were analyzed. The deterioration coefficients according to the water level and temperature of each single- and poly-crystalline module were investigated at very similar levels such as, -2.01 %/cm and -2.02 %/cm, -0.50 %/°C and -0.48 %/°C, respectively. Therefore, in salt farm aquavoltaic system, water levels need to maintain as low as possible, and heat-induced degradation is similar to those shown in general land, and no factors have been found to be affected by the underwater environment depending on the determination.

Key words: Aquavoltaic, Salt farm, Water level, Water temperature, PV module

1. 서론

매년 전 세계에서는 급격한 기후변화가 일어나고 있으며, 1차 에너지(특히 화석 연료)의 매장량 고갈 등의 이슈는 소수의 국가만의 문제가 아닌 지구 전체의 과제가 되었다. 현재까지 사용되고 있는 에너지원 중 가장 높은 비중을 차지하는 에너지원은 석유, 석탄 및 천연가스 등이며, 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)는 2040년에 이르러서도 세계 에너지 수요 중 석유, 석탄 및 천연가스가 여전히 주력 에너지원으로 사용될 것으로 전망하고 있다. 하지만 최근 코로나19로 '30년까지 에너지 증가세는 12%에서 다소 하향 조정된 최대 9%(최소 4%)로 조정될 것으로 판단된다. 하지만 2030년까지 석유 및 천연가스는 수요는 동·남부 아시아 중심으로 증가할 것으로 예상된다^{1,2)}. 물론 셰일가스 및 오일샌드 등의 상용화 기술 개발에 따른 기존 화석연료의 고갈 시기는 연장될 수 있으나, 현재 채굴수준 및 잠재 매장량(187.4 tcm)을 고려하면 최대 60여 년 이후 고갈될 것

으로 예상된다³⁾.

2015년 유엔기후변화협약 당사국 총회를 통해 교토의정서의 한계를 극복하고자 파리협정(Paris Agreement)을 통한 신기후체제가 출범되었다. 이에 각 국가들은 2030년까지 온실가스의 감축 목표 등을 더불어 신재생에너지 보급을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다.

에너지 수입의존도가 2016년 기준 약 94% (8,904억 달러)로 에너지안보 최약국인 대한민국은⁴⁾ 2017년 RE3020 (재생에너지 3020) 이행계획을 발표하여 2030년까지 재생에너지 발전량 비중 20%를 달성하고자 '18년~'30년 까지 48.7 GW의 재생에너지 보급을 추진하고 있다. 이 중 신규 재생에너지 발전 설비의 약 95% 이상을 태양광(약 63%)과 풍력으로 보급할 예정이다^{5, 6)}. RE3020의 성공적인 달성을 위해서는 난개발 보다는 지속 가능하며 주민수용성을 고려한 주민 참여형 및 협동조합형 보급 프로그램의 개발 그리고 국내 특성을 고려한 농업 및 어업 병행형 재생에너지의 개발 및 보급이 절실하다.

태양광 발전 등과 같은 신재생에너지에 대한 국민적 관심이 높지만 실제 보급을 위해 극복해야 할 여러 가지 문제점들이 산재되어 있다. 한정된 국토면적, 신재생에너지에 대한 오해로 인

*Corresponding author: chlim@gei.re.kr

한 부정적 인식과 주민 수용성 문제, 기존 에너지원의 기득권, 일부 무분별한 난개발로 인한 환경 파괴 등으로 보급에 어려움을 겪고 있다. 특히, 지금까지의 태양광 발전 시설 대부분은 농어촌에 설치되고 있으나 발전수의 대부분은 외지로 유출되고 있는 실정이다.

염전은 소금의 높은 상품성과 생산성을 위해 바람과 일조량이 풍부한 지역에 위치하며, 특히 국내 생산 천일염의 경우 프랑스 게랑드 천일염보다 마그네슘과 칼륨 등의 함량이 풍부하여 상품성이 높다. 하지만 최근 5년간 천일염 산지가격이 지속적인 하락세를 나타내며, 2012년(395원/kg) 대비 2017년(147원/kg) 천일염의 시장가격이 약 37% 수준을 나타내고 있다. 또한 2017년 12월 기준 재고량이 16만 톤으로 천일염 가격 하락세가 가속화되고 있다⁷⁾. 따라서 국내 염전산업의 활성화를 위한 천일염의 가격 안정과 천일염 생산 어가의 삶의 질의 제고를 위한 대책이 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 염전의 증발지에 태양광 발전 시스템을 도입하여 동일 부지에서 천일염 생산과 태양광 발전의 상생이 가능한 염전 병행 태양광 발전 시스템 개념을 세계 최초로 제안하여 침체된 염전 어가에 새로운 수익을 창출함과 동시에 국내 재생에너지 보급 활성화를 도모하고자 한다. 현재 국내 염전의 전체 면적은 약 4600만 m²로 이 중 증발지의 면적은 약 3900만 m²에 달한다. 따라서 국내 염전의 증발지에 염전용 수중 태양광 발전 모듈을 설치하면 약 4 GW의 전력 생산이 가능할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 염전 병행 태양광발전 시스템 개발을 위해 lab-scale 수준에서 해수의 수위 및 수온과 바람에 의한 외란 크기가 염전용 수중 단결정 및 다결정 실리콘 모듈의 발전량에 미치는 영향을 각각 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 모듈 및 수조 제작

본 연구에서는 4.5W급 단결정/다결정 실리콘 셀을 각 1매씩 라미네이팅하여 제작한 모듈 총 6종을 사용하였으며, 모듈화 전 4.5 W급 단결정/다결정 실리콘 셀의 세부특성을 Table 1에 나타내었으며, 제작 모듈 및 수조 별 수온/수위에 대한 발전량 조사를 위해 Fig. 1과 같이 구성하였다. Fig. 2와 같이 불필요한 광 산란을 제거하기 위해 black sheet로 원셀 미니 모듈을 각각 제작하였으며 폴리카보네이트 재질의 수조안에 단결정 및 다결정 실리콘 모듈을 수조 바닥면에 배치하였다. 각 모듈이 설치된 수조 내부의 수온 및 수위는 항온수조를 통해 제어된 물이 모의수조를 순환할 수 있도록 하였고, 항온수조에서 모의수조로 유입되는 유량은 유량계를 이용하여 제어하였다. 그리고 온도는 수조와 모듈 표면에 설치된 온도계를 통해 실시간으로 모니터링 하였다.

Table 1. Power generation characteristics of single- and polycrystalline silicon solar cells used in simulated water tank

	Poly-(DMEGC)			Single-(NICE SUN)		
	P1	P2	P3	S1	S2	S3
Pm (W)	4.36	4.4	4.47	4.6	4.64	4.8
Vmp (V)	0.537	0.539	0.54	0.537	0.54	0.574
Imp (A)	8.119	8.163	8.241	8.585	8.608	8.79
Voc (V)	0.637	0.639	0.64	0.639	0.639	0.643
Isc (A)	8.693	8.749	8.813	9.189	9.135	9.266
Efficiency (%)	17.9~18.0	18.1~18.2	18.3~18.4	19.0~19.1	19.1~19.2	19.8~19.9

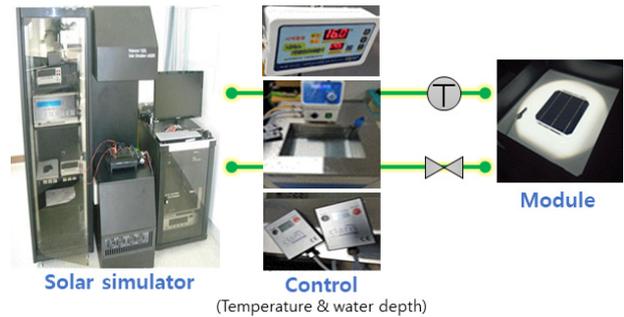


Fig. 1. Conceptual diagram of power generation by single- & polycrystalline module according to water temperature and level

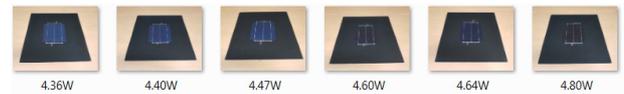


Fig. 2. Single- and polycrystalline one-cell mini module laminated with black sheet

2.2 염전용 수중 모듈 발전량 조사

염전용 수중 모듈 발전량에 수온과 수위가 미치는 영향을 조사하기 위해 각 수조의 온도를 10, 20, 30 그리고 40°C, 수위는 0, 2.5, 5.0, 7.5 및 10 cm로 각각 조절하였다. 또한 외란크기 조절은 모의수조 내 수위를 3 cm로 하고 일반 선풍기를 활용하여 바람 세기에 따라 외란 없음, 외란크기 대 및 소로 각각 조정하였다. 각 모듈의 수위 및 수온에 따른 발전량은 solar simulator (K201 LAB50)를 통해 측정하였다.

본 연구에서 사용된 염수는 바다에서 채취한 바닷물이 아닌 염도를 약 3.5%로 맞춘 증류수를 사용하였으며, 본 연구 이전에 염수농도 별(3~23%) 발전량 변화를 조사한바 큰 차이를 보이지 않았다.

3. 결과

3.1 수중 발전 특성 조사

본 연구에 사용된 단결정 모듈 3종(S1~3)과 다결정 모듈 3종(P1~3)을 대상으로 수온 및 수위에 따른 발전량을 비교하였다. 수온 및 수위에 따른 각 모듈의 발전량 비교를 위해 모의 수조에 물을 채우지 않은 조건으로도 각 모듈의 발전량을 또한 조사하였다. 6종의 측정결과 Figs. 3 ~ 7의 결과는 결정상을 대표하여 S1, P2 모듈 결과를 나타내었으며 Table 2의 수온 및 수위 열화 계수는 샘플 전체를 표시하였다.

3.1.1 수온 의존 특성

일반적으로 결정질 태양전지는 온도의 변화에 따라 발전량 증가 혹은 감소 등의 변화를 보인다⁸⁾. 이는 결정질 태양전지 소재의 고유 물성에 따라 달라지며, 온도가 올라갈수록 가전자대(valance band)에 있는 전자들이 전도대(conduction band)로 전이됨으로써 전도에 기여하는 전자수가 많아지고 전류가 상승하여 상대적으로 밴드 갭이 좁아지는 효과를 갖게 되어 전압 값은 낮아지는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 각 수위에 따른 단결정 및 다결정 모듈 별 발전량 특성을 조사하였다.

단결정 모듈 S1과 다결정 모듈 P2를 대상으로 각 수온에 따른 발전량의 변화를 조사한 결과, Fig. 3와 같이 수온이 증가할수록 P2와 S1 모듈 발전량 모두 선형적으로 감소하는 추세를 보였다. 또한, 각 수위(2.5~10 cm) 별 두 모듈의 발전량 역시 수온과의 관

계와 비슷한 양상을 나타내었다.

모의수조 내 수위(2.5~10 cm)을 평균화한 수온에 대한 단결정 S1의 발전량 저하는 0.51 %/°C 그리고 다결정 P2는 -0.48 %/°C로 각각 분석되었다. 일반적으로 단결정과 다결정의 발전량 저하는 -0.30~-0.55와 -0.35~-0.55 %/°C로 각각 보고된 바 있으며⁹⁾, 본 연구에서 조사된 평균화된 수위에서 각 모듈의 수온에 대한 발전량 저하율 역시 비슷한 결과를 나타내었다. 그리고, 단/다결정 모듈 총 6종에 대하여 수위 2.5와 10 cm에서 수온 변화에 따른 발전량 변화를 조사한 결과, 단결정 및 다결정 모듈의 효율감소 패턴이 서로 매우 유사한 양상을 보였으며(Fig. 3), 기존 발전량 변화와도 유사한 결과를 보인 것으로 조사되었다.

또한, 본 실험에서 얻은 평균 수온에 대한 단결정 및 다결정 모듈 별 발전량 저하는 -0.50 %/°C 및 -0.48 %/°C로 모듈 별 매우 유사한 수준으로 조사되었으며, 열에 의한 효율저하는 일반적인 육상에서 보여지는 수치와 유사함을 알 수 있다.

3.1.2 수위 의존 특성

단결정 모듈 S1과 다결정 모듈 P2의 각 수위에 따른 발전량 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 본 실험에서 실내온도는 16.9°C로, 각 수위(0, 2.5, 5.0, 7.5 및 10 cm)에 따라 실리콘의 결정 입계(Grain boundary)나 순도의 차이 등이 발전량에 미치는 영향을 조사하였다.

수위에 따른 각 모듈의 발전량은 수온과 마찬가지로 수위가 증가함에 따라 대상 모듈(S1 및 P2)의 발전량은 선형적으로 감

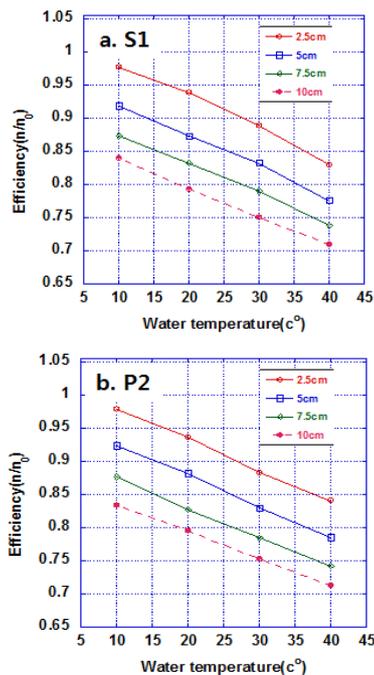


Fig. 3. Investigation of power generation characteristics according to water level by water temperature of single- (S1) and poly-crystalline (P1) modules

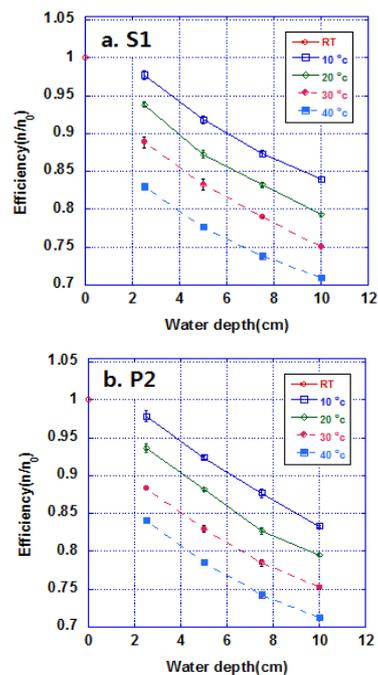


Fig. 4. Investigation of power generation characteristics according to the water level of single- (S1) and poly-crystalline (P2) modules

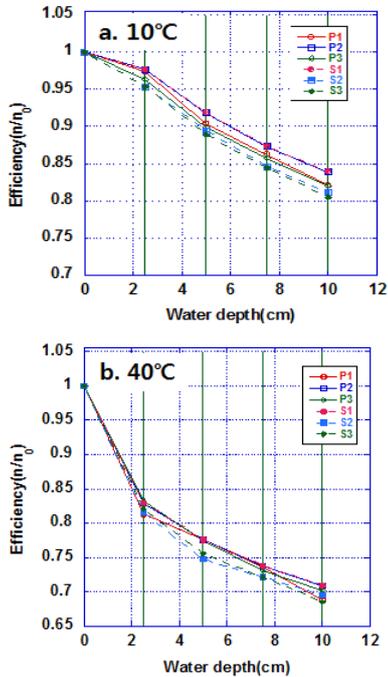


Fig. 5. Investigation of power generation characteristics according to water temperature and water level of 6 types of single- and poly-crystalline module; a. 10°C and b. 40°C

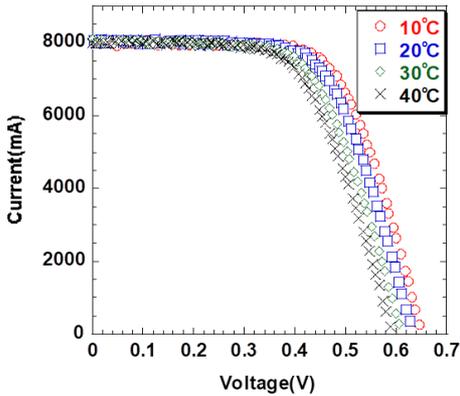


Fig. 6. I-V curve analysis of poly-crystalline module (P2) according to water temperature (10~40°C)

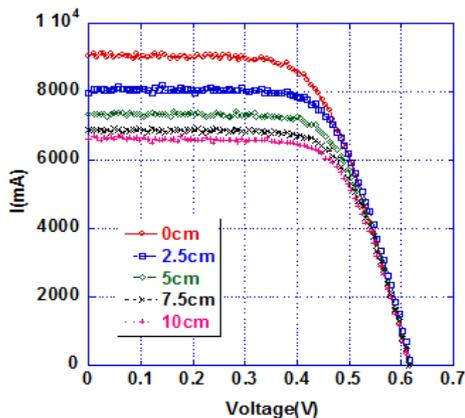


Fig. 7. I-V curve analysis of poly-crystalline module (P2) according to water level (0~10 cm)

소하는 양상을 나타내었다. 또한, 6종의 모든 모듈을 대상으로 수온을 10°C와 40°C로 각각 설정하여 각 모듈 별 수위에 따른 발전량 변화를 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. 각 설정 온도에서 6종 단결정 및 다결정 모듈의 수위에 따른 발전량 변화 모두 비슷한 양상을 보였으며, 평균 수위에 대한 발전량 감소는 단결정 모듈은 -2.01 %/cm 그리고 다결정 모듈은 -2.02 %/cm로 조사되었다. 따라서 결정상에 따라 수중환경에 영향을 받는 요소는 발견되지 않았다.

다결정 모듈 P2를 대상으로 수온 및 수위에 따른 I-V curve를 확인한 결과 Figs. 6과 7에 각각 나타내었다. 수위가 0에서 5 cm 까지 증가함에 따라 전류가 상대적으로 급격히 감소하였으나, 일정 수위(>5.0 cm)부터 감소의 폭이 일정해지는 양상을 볼 수 있었다. 이는 상대적으로 얇은 수위에서의 발전량 감소율과 깊은 수위에서의 감소율이 다르다는 것을 의미한다. 따라서 추후 파장대별로 수위가 발전량에 미치는 영향에 대하여 전산모사 등을 통한 추가 분석이 필요한 것으로 판단된다. 또한 10~40°C 까지 수온 변화에 따른 I-V curve를 분석한바, V_{oc} 가 0.59~0.67 V 까지 변화를 보였다. 이는 온도 상승으로 인한 V_{oc} 가 선형적으로 감소하였으며 염전 환경에서 증가한 모듈 온도는 V_{oc} 를 감소시켜 발전량이 감소되는 것으로 판단된다. 또한 염수가 효과적으로 모듈을 냉각 시키면 V_{oc} 증가로 인한 발전량 향상이 기대 된다.

3.1.3 외란 크기 의존 특성

수중 태양광 발전 시스템을 실제 염전에 도입하였을 경우, 염전은 바람이 많은 지역으로 외란에 따른 수중 태양광 모듈의 발전특성을 조사한바, 외란의 크기 별 단결정 및 다결정 모듈 간 발전량 차이는 보이지 않았다. 물론 단결정 및 다결정 모듈 모두 바람의 세기가 강해짐에 따른 외란의 크기가 증가함에 따라 발전 효율의 차이는 최대 약 2% 가량 차이를 보였다.

본 연구를 통해 일정세기의 바람에는 큰 발전량 차이를 보이지 않았으나, 추후 실제 염전에 수중 태양광 발전 시스템을 적용하여 실제 기후에 따른 발전효율 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통해 해당 수중 모듈 중 수온에 의한 발전량 저하는 다결정 0.48 %/°C, 단결정 0.50 %/°C로 각각 조사되었으며, 모듈 별 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 수위에 의한 발전량 감소 계수 또한 단결정과 다결정 상에 유의미한 수치의 차는 나타나지 않았다(Table 2). 즉, 염전 태양광 발전 시스템에서 수위는 가능한 저수위를 유지할 필요가 있으며 열에 의한 효율저하는 일반적인 육상에서 보여지는 수치와 유사함을 알 수 있으며 결정상에 따라 수중환경에 영향을 받는 요소는 발견되지 않았다.

또한, 바람세기에 따른 외란 크기 변화에 대한 단결정 및 다결정 모듈의 발전효율 역시 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 추후

Table 2. Investigation of water temperature and level deterioration coefficient of single- & poly-crystalline module

		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Avg
Coeff. by temp. (%/°C)	Poly	-0.48	-0.49	-0.47	-0.48
	Single	-0.51	-0.50	-0.48	-0.50
Coeff. by level (%/cm)	Poly	-2.04	-1.99	-2.04	-2.02
	Single	-1.99	-1.99	-2.05	-2.01

prototype을 대상으로 실제 염전 환경에서의 다양한 염해 환경에 대한 발전효율 특성 분석이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국전력공사 재원으로 한국전력연구원의 지원을 받아 수행하였습니다(과제번호: R16EA09).

References

1. International Energy Agency, World Energy Balances 2017, 2017.
2. International Energy Agency, World Energy Outlook 2020: Executive Summary, 2020.
3. BP Global, BP Statistical Review of World Energy, 2017.
4. Korea Energy Economics Institute, 2016 Energy Info Korea, 2016.
5. Korea Energy Economics Institute, Korea Energy Review Monthly, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018.
6. Ministry of Trade, Industry and Energy, Implementation plan for "Renewable Energy 3020", 2017.
7. Mokpo National University, A Study on the Production Quantity Management of Solar Salt, Ministry of Oceans and Fisheries, 2018.
8. Wang, M. H., Chen, M. J., "Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems," Int. J. Photoenergy, Vol. 2012, pp. 1-10, 2012.
9. Dash, P. K., Gupta, N. C., "Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules," Int. J. Eng. Res. Appl., Vol. 5, No. 1, pp. 148-151, 2015.