

## 200kW 급 태양광발전 어레이 표면의 냉각/세정에 대한 장기 실증 실험<sup>§</sup>

한준선\* · 정성대\* · 유상필\*† · 이승수\*\*

\*(주)하이레벤 기업부설연구소, \*\*SK E&S R&D Department

### Long-Term Experiments of Cooling/Cleaning on Surface of 200-kW PV Power Array

Jun Sun Han\*, Seong Dae Jeong\*, Sang Phil Yu\*†, Seong Su Lee\*\*

\*Research Center of HILEBEN CO., LTD. \*\*SK E&S R&D Department

(Received May 11, 2012 ; Revised September 16, 2013 ; Accepted September 25, 2013)

**Key Words:** Cooling(냉각), Cleaning(세정), Power Efficiency(발전 효율), Photovoltaic Module(태양광 모듈), Long-Term Experiments(장기실험), Capacity Factor(이용률)

**초록:** 태양광 발전은 일사량이 높을수록 발전량이 증가된다. 그러나 일사량이 높아짐에 따라 셀의 온도도 같이 증가하여 발전효율은 감소하게 된다. 일반적으로 태양광 셀(Cell) 표면의 온도를 1°C 감소시키면 약 0.5%의 발전량의 증가가 있다고 알려져 있다. 본 논문은 태양광 발전량 증가를 위해 냉각/세정 장기 실증 실험을 수행하였다. 기전력과 집광량을 높이기 위해 모듈 표면 온도를 낮추고 오염 물질을 제거하는 냉각/세정 기술을 이용하였다. 실험 방법은 냉각/세정 설비가 설치된 곳과 설치되지 않은 곳의 이용률을 비교하였다. 장기 실증 시험을 결과 냉각/세정 설비의 구동으로 인한 발전량이 최소 13%에서 최대 19%까지 증가하였다.

**Abstract:** In general, the solar photovoltaic power increases with higher solar insolation. However, the solar cell generation efficiency reduces because the solar cell surface is heated by solar insolation. According to advanced research, with a 1°C increase in the solar cell surface temperature, the generation efficiency decreases by ~0.5%. To solve this problem, we conducted experiments in which we attempted to reduce the solar cell surface temperature using a water jet spray. In this study, we found the long-term experimental results of increases in solar power generation. The experimental results show a comparison of the site with and without cooling and cleaning equipment being installed. The results of the long-term experiments show that solar photovoltaic power generation is increased by at least 13% up to 19% with cooling and cleaning.

- 기호설명 -

kWh : 시스템 발전량  
KW : 시스템 설비용량

### 1. 서 론

탄소 기반의 에너지 자원이 야기하는 지구온난

화 등의 우려와 전통적으로 에너지 위기의 대안으로 일컬어진 원자력 발전에 대한 거부감의 확산으로 다양한 신재생에너지의 활용이 관심을 끌고 있다. 다양한 재생에너지의 대안 중 하나인 태양광 발전은 반도체 또는 염료, 고분자 등의 물질로 이루어진 태양전지를 이용하여 태양에너지를 받아 바로 전기에너지로 변환하는 발전시스템 기술이다. 태양광 발전의 장점은 석탄, 석유등의 유한적인 자원에 반해 태양광만 있으면 지속 가능한 발전 방식이며, 발전 과정에서 공해가 배출되지 않은 청정 발전방식이다. 최근 태양광 발전에 있어 발

§ 이 논문은 대한기계학회 열공학부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 22-24., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, [phill@hileben.com](mailto:phill@hileben.com)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

전단가를 낮추어 그리드 패리티를 앞당기려는 노력과 BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 기술 등을 위해 다양한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

태양광 발전의 경우 일조시간, 온도 등의 설치 조건에 따른 환경 변화, 구성요소기기 및 태양광 발전 시스템의 설계 시공에 따라서 발전 성능이 결정된다. 태양광 발전 기술은 크게 3 가지로 분류가 되며 (1)태양전지(Solar Cell), (2)전력처리(Power Conditioning System), (3)BOS (Balance of System) 기술로 구성된다. 이 중 (1)태양전지 기술은 실리콘 결정질 태양전지가 상용화되어 활발히 보급, 확산되고 있다. 차세대 전지로 각광받는 비실리콘 박막형 태양전지는 아직은 대체로 낮은 효율과 모듈의 수명에 대한 연구가 부족하여 현재의 실리콘 결정질 태양전지를 대체하기에는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예상된다. (2)전력처리(PCS) 기술의 경우, 디지털화로 인한 기술의 완성도가 높은 편이다. 따라서 기술개발의 여지가 적으나, 전력저장 기술 관련된 수요는 향후 기대되는 부분이다. 마지막으로 (3)BOS 기술은 시장규모에 비해 상대적으로 진입장벽이 낮다고 인식되었으나, 최근 즉각적이고 효과적인 출력향상이 BOS 기술의 개발에 의해 최적화된 발전으로 구현이 가능하다는 인식이 확산되고 있다. 특히 본 연구가 해당되는 태양광발전 모듈의 냉각, 세정에 대한 출력향상은 상당기간 전 세계 연구자들에 의해 효과가 연구되어 왔으나, 상용화된 수준의 제품출시가 경제성 문제에 걸려 미뤄져 왔다. 하지만, 최근 FIT나 RPS 와 같은 대규모 상업용 발전에 대한 정부기관의 지원제도에 힘입어, BOS 기술을 통한 출력향상은 태양광발전의 수익성을 높이는 매력적인 방법으로 부상하고 있는 상황이다.

기존 태양광 발전은 별도의 구동장치나 유지관리 없이 단순히 태양광을 집광하여 출력을 얻을 수 있다는 것이 큰 장점이었으나, 대규모의 상업용 태양광 발전소가 출현함으로써 적절한 유지 관리를 통하여 발전수익을 극대화 하는 방안이 활발히 모색되고 있다. 태양광발전의 유지관리를 통하여 발전수익을 극대화 하는 BOS 기술은 크게 모듈의 집광량을 높이는 기술, 모듈의 광기전력을 높이는 기술, 모듈 또는 어레이 상에서 저 출력 spot 을 감지하는 기술 등을 예로 들 수 있다.

본 실증연구에 적용된 BOS 기술은 태양광발전 모듈의 표면에 대해 냉각/세정을 위해 냉각수를 적정수압으로 균일 분사하는 방법으로써, 태양광 발전 모듈의 기전력과 집광량을 높여 발전출력을

향상시킨다.

실리콘 계열 태양전지는 1°C 상승 시, 약 0.5% 가량의 출력 감소가 나타나는 것이 실리콘 물성의 열적 특성이며, 이를 고려하여 온도에 따라 모듈의 MPP(Maximum Power Point)가 변한다.

본 논문에서는 태양전지에 대한 냉각/세정을 통하여 태양전지의 광기전력과 집광량을 향상시킬 수 있는 수냉각 기술을 적용하여 현재 설치되어있는 태양광 발전소(200kW)에 대한 실증 실험을 수행하였다. 수냉각이 적용된 년도와 그렇지 않은 년도에 대해서 냉각/세정 효과를 통한 장기간의 발전량 차이를 비교, 분석하였다.

### 2. 모듈냉각방식

태양광 모듈에 대한 냉각 방법은 크게 공랭식과 수냉식 방법으로 나누어지며, 구동 방식에 따른 분류는 Table 1 과 같다.

구동 방식에 따라 Passive 와 Active 로 나누어지며 현존하는 냉각 방식 중 마이크로 채널(열 교환기)이 가장 열 전달률이 높다.<sup>1)</sup>

하지만 Micro Channel 방식은 우수한 열 전달 효과에도 불구하고, 압력 손실이 높고, 금속 내부의 scale 문제로 인해 경제성이 낮다. 반면, 충돌 제트 방식은 모듈 표면에 모멘텀을 전달하여 모듈 표면 오염을 해소하여 세정효과를 추가하므로 냉각과 세정의 효과를 동시에 적용할 수 있는 이점이 있다고 할 수 있다.

열 전달과 모멘텀 전달에 있어서 충돌제트 방식이 Spray(입자 비산)나 자유유동(홀러내림) 방식에 비해 수백 배 이상의 차이를 갖는다. 이는 한정된 냉각수를 효율적으로 사용하는 방식에 있어서 충돌제트방식이 상대적으로 우월하다는 것을 의미

Table 1 Thermal resistance effected refrigerant and cooling system

| 냉매에 따른 분류 | 구동방식    | 구분            | 열저항 (Km <sup>2</sup> /W) |
|-----------|---------|---------------|--------------------------|
| 공랭식       | Passive | 방열핀 (자연대류)    | 1.1×10 <sup>-2</sup>     |
|           | Active  | 모터구동팬 (강제대류)  | 3.0×10                   |
| 수냉식       | Passive | 냉매순환 (자연대류)   | 8.7×10 <sup>-4</sup>     |
|           | Active  | Micro Channel | 3.1×10 <sup>-6</sup>     |
|           |         | Spray (입자 비산) | 2.6×10 <sup>-3</sup>     |
|           |         | 충돌 제트         | 1.0×10 <sup>-6</sup>     |

한다. 또한 모듈에서 입자가 경계면을 형성하여 증발 후 잔여물이 남는 물 때(water scale) 발생측면에서도 충돌 제트 방식이 유리하다. 이는 입자 비산 방식이 냉각수가 순수해도, 모듈 표면의 이물질이 용해되어 증발잔여물로 퇴적됨으로써, 물 때 발생이 가속화되는 것이 쉽게 육안으로 관찰되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 충돌제트 분사방식이 집광량과 기전력을 향상시키기 위한 태양광발전 냉각/세정의 최적의 방식이라 판단, 적용하게 되었다.

3. 실증 실험

3.1 비교방법

본 실증 시험이 시행된 곳은 경북 구미 발전소이다. 각 발전소 별 설비용량 및 비교 방법은 Table 2 와 같다.

Fig. 1 의 경우 태양광 발전소의 냉각/세정 설비가 설치된 예시이며, 실증 시험에 사용된 비교 방법은 크게 전년 대비 현재의 발전량을 비교하는 방법과 같은 지역의 인버터에서 냉각/세정 시스템의 설치 유무로 나누어 동시적으로 발전량을 비교하는 동시비교 방법으로 나누어진다. 현 발전소에서 사용한 비교 방법은 전년대비 현재 발전량을 사용하여 비교를 수행하였다.

Table 2 Local capacity and the comparative method

| 발전소       | 냉각/세정기술 적용 용량 | 비교 방법               |
|-----------|---------------|---------------------|
| 경북 구미 발전소 | 200kW         | 기상청의 일조량 기준 전년대비 비교 |



Fig.1 Plant overview installed Cooling/cleaning system

3.2 시스템 이용률

시스템의 이용률은 발전시스템이 24 시간 동안 발전한다는 가정 하에 일조시간 동안 발전된 시스템의 발전량의 비로써 시스템의 이용률 분석에 사용된 관계는 식 (1)과 같다.

$$\text{발전시스템 이용률(\%)} = \frac{\text{시스템 발전량(kWh)}}{\text{시스템설비용량(kW)} \times 24(\text{h}) \times \text{일수}} \times 100\% \quad (1)$$

3.3 전년 대비 효율향상에 대한 관계식

전년 대비 비교 방식은 태양광 설치 지역에 모두 냉각/세정 장치가 설치되어, 부득이하게 미 설치된 년도의 발전량을 비교 분석하는 방법이다. 이때 비교 방법은 전년대비 일조시간의 비와 발전량의 증가를 나타내는 출력향상률로 냉각/세정의 효과를 확인하기로 한다. 효율향상 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\frac{\text{적용년도발전량}}{\text{적용년도일조시간}} \cdot \frac{\text{미적용년도발전량} \times (100\% - \text{연감가상각률(\%)})}{\text{미적용년도일조시간}}}{\frac{\text{미적용년도발전량} \times (100\% - \text{연감가상각률(\%)})}{\text{미적용년도 일조시간}}} \times 100\% \quad (2)$$

이때 연 감가상각률의 경우 태양광발전 설비 초기 프로젝트 파이낸싱 설정 시 연간 감가상각은 1%로 산정하여 결과를 도출하였다. 또한 전년 대비 일조시간의 비는 식 (3)과 같다.

$$\frac{\text{적용년도 일조시간} - \text{미적용년도일조시간}}{\text{미적용년도일조시간}} \times 100\% \quad (3)$$

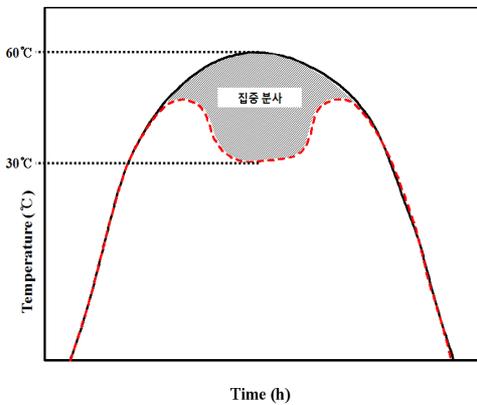
3.4 실험 조건

태양광 발전 모듈에 일정 간격으로 냉각/세정 기술을 적용하고, 약 3kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 펌프를 통해 가압하여 충돌 제트를 일정 시간 간격 또는 모듈이 일정 온도가 이상이 되었을 때 발생시켰다. 일정 기간을 나누어 오전 8시부터 오후 6시까지 냉각수를 분사하되, 일중 고도가 최고이며, 모듈에 대한 온도가 가장 높은 수치를 나타내는 오후 12시부터 오후 2시까지는 냉각수의 분사량을 늘려, 분사 간격을 좁혀 시간당 냉각수의 분사량을 집중시키는 분사 방식을 구현하였다. 이러한 분사 방식은 단위 냉각수량 당 태양광 모듈의 열량을 많이 뺏을 수 있는 방식이므로 한정된 냉각수량 하에 더욱 효율적으로 모듈을 냉각할 수 있다.

Fig. 2 와 같이 실제 발전소의 모듈 표면에 냉각 세정 기술을 적용할 경우 일중 모듈 표면 온도변화는 평균 60℃에서 30℃로 저하된다.

**Table 3** Confirmation for Driving cooling/cleaning system

| 월    | 2010 | 2011 |
|------|------|------|
| 1 월  | 비 구동 | 비 구동 |
| 2 월  | 비 구동 | 비 구동 |
| 3 월  | 구동   | 비 구동 |
| 4 월  | 구동   | 구동   |
| 5 월  | 구동   | 구동   |
| 6 월  | 구동   | 구동   |
| 7 월  | 비 구동 | 구동   |
| 8 월  | 구동   | 구동   |
| 9 월  | 구동   | 구동   |
| 10 월 | 구동   | 비 구동 |
| 11 월 | 비 구동 | 비 구동 |
| 12 월 | 비 구동 | 비 구동 |

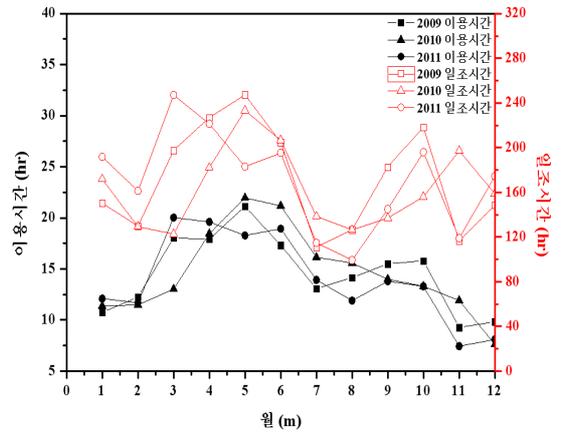


**Fig. 2** Daily module temperature after water injection

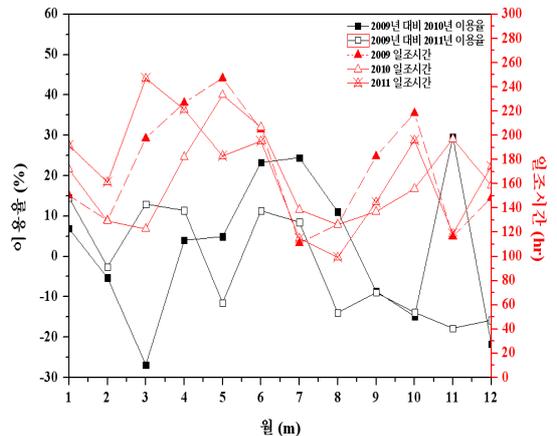
3.5 결과 비교 및 검토

경상북도 구미시에 위치한 발전소의 경우 총 설비용량은 200kW 로 냉각/세정 기술은 2009 년 12 월에 적용되었고, 모든 모듈에 냉각/세정 기술이 적용되어 기상청의 일조량 기준으로 전년 대비 비교를 수행하였다. 총 비교 기간은 냉각/세정 기술이 적용되지 않은 2009 년부터 냉각/세정 기술이 적용된 2010 년과 2011 년을 비교 하였다. 또한 2010 년 과 2011 년의 겨울철의 경우 동파 방지를 위하여 냉각/세정 기술을 구동 하지 않았다. 냉각/세정 기술에 대한 구동 여부는 Table 3 과 같다.

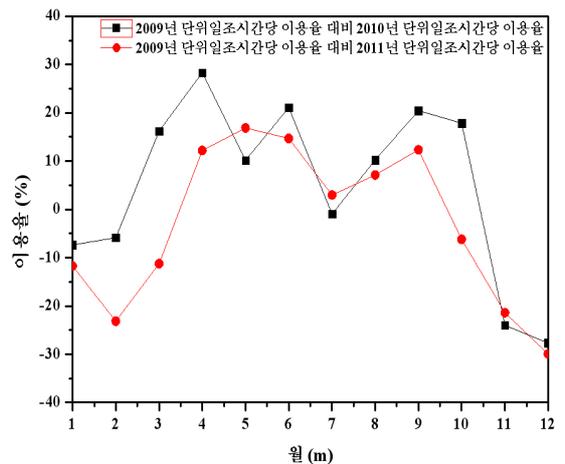
Fig. 3 에서 확인하면 전반적으로 이용시간이 향



**Fig. 3** Monthly working time & irradiation time



**Fig. 4** Capacity factor in 2010's & 2011's compared to 2009's



**Fig. 5** Capacity factor per unit irradiation time in 2010's & 2011's compared to 2009's

상 되었으나, 냉각/세정 기술이 적용 되지 않은 월에 보면 오히려 더욱 하락하였다. Fig. 4 처럼 이용률 또한 전반적으로 2010 년이 높게 측정 되었으며, 2011 년 보다 높은 이용률을 보였다. 이는 태양

광 모듈의 설비노후화 현상으로 인해 출력이 전년 대비 이용률이 저하되는 것으로 보인다.

일년 평균 2010 년 19.29%, 2011 년 13.77%의 출력 향상률을 보였으며, 이는 모듈 표면의 냉각/세정 기술이 출력의 증대와 직결 되는 것을 반증하는 사례이다.

Fig.5 에서 알 수 있듯이 단위 일조시간당 이용률로 보면 냉각/세정 설비가 운영 되지 않은 달을 제외하고 모두 높은 이용률을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 일조 시간이 2009 년이 2010 년과 2011 년 보다 높았지만 그에 반해 이용률은 오히려 높은 것으로 확인 되었으며, 이는 냉각/세정 설비로 인한 출력이 향상 되어 높은 이용률을 보인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

장기 실증 시험 결과 전년 대비 비교를 통하여 2010 년 19.29%, 2011 년 13.77%의 출력 향상을 보였다. 향후 냉각수의 공급을 증가시키거나, 단위 냉각수당 냉각효율을 높일 경우 더욱 높은 이용률 증가를 보일 것으로 기대된다.

냉각/세정에 있어서 태양광발전의 출력은 일조 시간에 비례하였으며, 일조시간이 많고 일사량이 증가될 경우 높은 발전량을 도출 할 수 있다.

또한 한정된 냉각수량을 보다 효율적으로 사용하기 위해 최적의 냉각 세정 기술이 필요하며, 이는 H/W 적인 측면과 S/W 적인 측면으로 나누어진다. H/W 측면에서 보다 효과적인 분사노즐기술이 적용가능하며, S/W 측면에서는 냉각수의 분사간격, 시간대, 분사지속시간 등의 일중고도에 따른 최적화가 필요하다. 태양광발전 냉각/세정에 대해 좀 더 최적화된 기술이 적용된다면, 향후 태양광발전 이용시간 향상에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

특히, 태양광발전의 수익성은 보급 확산에 가장 중요한 요소 중 하나이며, 이를 본 연구에 적용된 냉각/세정 기술을 적용하여 즉각적으로 향상시킬 수 있다는 점은 향후 본 연구를 심화해나갈 필요성을 충분히 나타내준다.

#### 참고문헌

- (1) Emerging PV industry, SAMSUNG Economic Research, 2008.
- (2) Yu, S. P., Kim, E. H., Jeong, S.D., Seo, Y.S. and Jeong, N.J., 2011 The Korean Solar Energy Society Long-Term Experimental Study on the Improving PV Power By the Water Cooling for Si-Solar Modules.
- (3) Bione, J., Vilela, O.C. and Fraidenraich, N., 2004, "Comparison of the Performance of PV Water Pumping System Driven by Fixed, Tracking and V-Trough Generators," *Solar Energy* 76 pp. 703~711.
- (4) Yun, G. Y., McEvoy, M. and Steemers, K., 2007, "Design and Overall Energy Performance of a Ventilated Photovoltaic Façade," *Solar Energy* 81 pp. 383~394.
- (5) Royne, A., Dey, C. J. and Mills, D. R., 2005, "Cooling of Photovoltaic Cells Under Concentrated Illumination: a Critical Review," *Solar Energy Materials & Solar cells* 86 pp. 451~483.
- (6) Skoplaki, E. and Palyvos, J.A., 2009, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations," *Solar Energy* 83 pp. 614~624.
- (7) Tonui, J.K. and Tripanagnostopoulos, Y., 2008, "Performance Improvement of PV/T Solar Collectors with Natural Air Flow Operation," *Solar Energy* 82 pp. 1~12.
- (8) Stamenic, L., Smiley, E. and Karim, K., 2004, "Low Light Conditions Modelling for Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems," *Solar Energy* 77 pp. 37~45.
- (9) Tonui, J.K. and Tripanagnostopoulos, Y., 2007, "Air-Cooled PV/T Solar Collectors with Low Cost Performance Improvements," *Solar Energy* 81 pp. 498~511.
- (10) Coventry, J. S., 2005, "Performance of a Concentrating Photovoltaic/Thermal Solar Collector," *Solar Energy* 78 pp. 211~222.
- (11) Odeh, S. and Behnia, M., 2009, "Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling," *Heat Transfer Engineering* 30(6) pp. 499~505.
- (12) Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T.H., Souliotis, M. and Yianoulis, P., 2002, Hybrid photovoltaic/thermal Solar Systems," *Solar Energy* 72(3) pp. 217~234.
- (13) Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H. and Yang, H., 1997, "Thermal Regulation of Photovoltaic Cladding," *Solar Energy* 61(3) pp. 169~178.
- (14) Jones, A. D. and Underwood, C. P., 2001, "A Thermal Model for Photovoltaic Systems," *Solar Energy* 70(4) pp. 349~359.
- (15) Krauter, S., 2004, Increased Electrical Yield via Water Flow over the Front of Photovoltaic Panels," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 82 pp. 131~137.
- (16) Fahmy, E. A. S. F. H., Abd-el Aziz, M. M., Mahmoudi, P. Z. A., "Increased Efficiency in the Conversion of Solar Energy to Electric Power," *Energy Sources* 21 pp. 367~377.
- (17) Skoplaki, E., Palyvos, J.A., 2009, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations," *Solar Energy*, 83 pp. 614~624.