

# 태양광 발전소의 Snail trail 열화 현상과 출력 손실의 영향성 분석

오원욱\* · 김대성\*\* · 전성근\*\*\* · 윤아영\*\*\*\* · 김남승\*\*\*\*\* · 김상수\*\*\*\*\* · 서근원\*\*\*\*\* · 최훈주\*\*\*\*\*

\* (주)에스테코 연구소장  
\*\* (주)에스테코 선임연구원  
\*\*\* (주)에스테코 주임연구원  
\*\*\*\* (주)에스테코 연구원  
\*\*\*\*\* (주)에스테코 과장  
\*\*\*\*\* (주)에스테코 부장  
\*\*\*\*\* (주)에스테코 부사장  
\*\*\*\*\* (주)에스테코 대표이사, 건국대학교 전기공학과 박사과정

## Analysis of the Impact of Power Loss by Snail Trail Degradation in Solar Power Plant

Oh Wonwook\* · Kim Daesung\*\* · Jeon Seonggeun\*\*\* · Yoon Ayoung\*\*\*\* · Kim Namseung\*\*\*\*\* · Kim Sangsoo\*\*\*\*\* · Seo Kun Won\*\*\*\*\* · Choi hoonjoo\*\*\*\*\*

\* R&D Director, STECO Corporation  
\*\* Senior Research, STECO Corporation  
\*\*\* Assistant Research, STECO Corporation  
\*\*\*\* Research, STECO Corporation  
\*\*\*\*\* Manager, STECO Corporation  
\*\*\*\*\* General Manager, STECO Corporation  
\*\*\*\*\* Vice President, STECO Corporation  
\*\*\*\*\* CEO, STECO Corporation, Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Konkuk University

† Corresponding author: oh@s-teco.co.kr



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.40, No.6, pp.1-7, December 2020  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.6.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 23 September 2020

Accepted: 03 November 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### Abstract

The snail trail is a common degradation phenomenon that is observed in solar power plants. Although the occurrence of cosmetic problems has been reported in previous studies, the contribution of these problems to the actual power loss is negligible. However, the cracking of the solar cell induces a loss in the output. We analyzed the results of the thorough investigation of a 95 kWp solar power plant that was operated in the field for 5 years. The snail trail phenomenon was observed in a specific module using current-voltage measurement, electroluminescence analysis, and visual inspection. We evaluated the impact of the loss in the generated power via image extraction.

**Keywords:** 달팽이 흔적(Snail trail), 태양광 모듈(PV module), 열화(Degradation), 발전량 손실(Power loss), 전계발광(Electroluminescence)

## 1. 서론

태양광 발전은 설치 이후 20년 이상 안정적인 운영이 가능하고, 미래의 친환경 재생에너지로 최근 단가 절감과 고효율 기술 등이 접목되어 설치가 확대되고 있다. 이러한 태양광 발전 시스템은 제조 기술뿐만 아니라 제품의 성능과 수명을 평가하고 열화 및 고장 분석을 통해 옥외 태양광 발전소의 신뢰성을 향상시키는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. Fig. 1과 같이 snail trail 현상은 옥외에서 흔히 발견되는 열화 현상중의 하나로, 2012년부터 필드에서 관찰되어 활발하게 그 원인을 규명하는 연구가 진행되었다<sup>1-4)</sup>. 발생원인은 태양전지의 Ag 전극의 표면과 EVA에서 발생하는 변색 현상으로 Ag, C, S, P와 수분과의 반응에 의한 화합물 형태이다. 일반적으로 크랙을 수반하지 않은 Snail trail은 태양전지의 전기적 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 보고된다<sup>5)</sup>. 그러나 셀 크랙을 수반하는 snail trail의 경우 크랙의 형태에 따라 심각한 출력 손실을 유발할 수 있다.

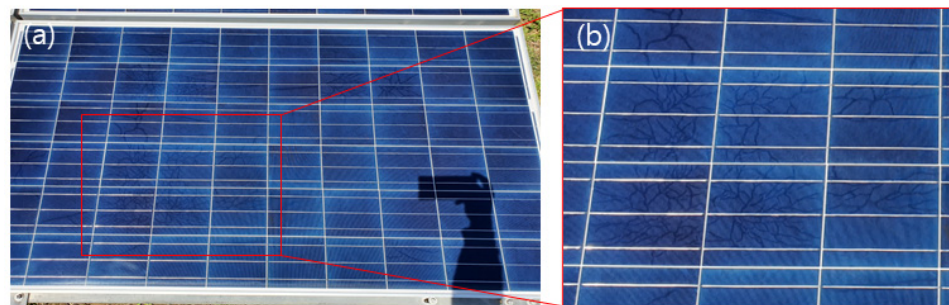


Fig. 1 Snail trail image (a) PV module, (b) Enlarged snail trail image

모듈의 크랙 발생 원인은 생산 공정, 모듈 운송 및 하차, 시공 및 작업자의 부주의, 하중(풍하중, 설하중, 진동 하중 등) 등으로 구분 가능하다. 특히, 어레이의 밀집에 의해 작업자가 모듈을 밟거나, 모듈을 시공할 때 백시트 스크래치가 발생하는 시공성 불량과 지반침하로 인해 구조물이 변형된 사례가 빈번히 관찰된다. 이러한 경우 어레이 끝단에서 발생되고, 크랙의 형태가 모듈 내 X자 형상을 보인다. 모든 모듈이 snail trail 현상을 발생시키지는 않는다. 그러나 snail trail 현상이 발생하는 제조와 시공, 구조 환경 등의 복합적인 원인에 의해 발생될 수 있다. 동일한 모델의 태양광 모듈에서도 발전소의 설치 환경에 따라 발생의 정도가 다를 수 있다.

MBJ Solar Module Judgment Criteria에 따르면, electroluminescence (EL) 측정 결과를 이용하여 크랙의 형태로 uncritical, critical, very critical의 3가지 구분과 모듈 내 해당 태양전지 빈도를 이용하여 4가지 class로 분류하였고, 예상 출력 범위를 설정하였다<sup>6)</sup>. 크랙을 수반한 snail trail의 경우 충분히 연간열화율 이상의 출력 손실을 발생시킬 수 있다. 대부분의 선행 연구는 snail trail의 메커니즘과 출력 손실 등을 랩 스케일로 분석하였고, 실제 필드의 가동중인 발전소의 전수 조사 데이터는 전무하다.

본 논문에서는 2015년 설치된 95 kW 태양광 발전소에서 250 W 모듈 380개를 전수조사한 분석 결과를 다루었다. 약 78%의 모듈에서 snail trail 현상이 발견되었고, 모든 모듈을 육안검사와 EL, 스트링 단위 I-V 측정을

통해서 발전소에서 발생한 snail trail 현상이 출력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 발전소의 평가를 위해 위의 class 분류와 유사한 방법으로 snail trail의 심각도를 3가지로 구분하고, EL 측정 이미지를 활용하여 암 이미지 추출 영역의 면적을 활용해서 정량적인 모듈 출력 손실을 계산하였고, I-V 측정 결과를 통해 스트링 단위의 출력 손실을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 발전소 정보

95 kWp 태양광 발전소는 다결정 태양광 모듈 250 W 380개로 구성되었고, 어레이는 20직렬과 19병렬로 100 kW급 인버터에 연결되었다. 2015년 가동을 시작하여 약 5년 운영되었고, 방위각 구조물은 스파이럴 방식으로 고정식 4단, 방위각은 176도, 경사각 23도로 설치되었다.

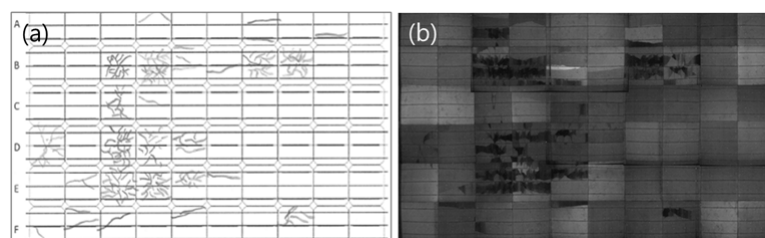
### 2.2 분석 절차

발전소의 분석은 육안검사, 스트링 단위 I-V 측정, EL 측정 등으로 수행하였다. Snail trail을 진단하는데 유용한 기법은 육안검사와 EL 측정이다. 우리는 snail trail 발생 형태를 육안검사를 통해서 스케치하여 기록하였고, 발생 빈도와 심각도 수준 등을 고려하여 정상부터 심각까지 3가지로 구분하였다. EL은 모든 모듈을 측정하였고, 육안검사의 형태와 EL에서 발견된 크랙의 형태와 발생된 태양전지의 수를 비교하였다. 측정된 EL 이미지를 이미지 추출 프로그램으로 암영역의 면적을 계산하였고, 실제 모듈의 출력 측정 결과와 비교하였다. 스트링 단위 I-V 측정은  $800 \text{ W/m}^2$  이상의 일사조건에서 수행하였고, 표준상태로 환산하여 스트링의 출력 분포와 손실을 초기 대비 출력비를 환산하여 열화의 정도를 평가하였다.

## 3. 본 론

### 3.1 육안검사

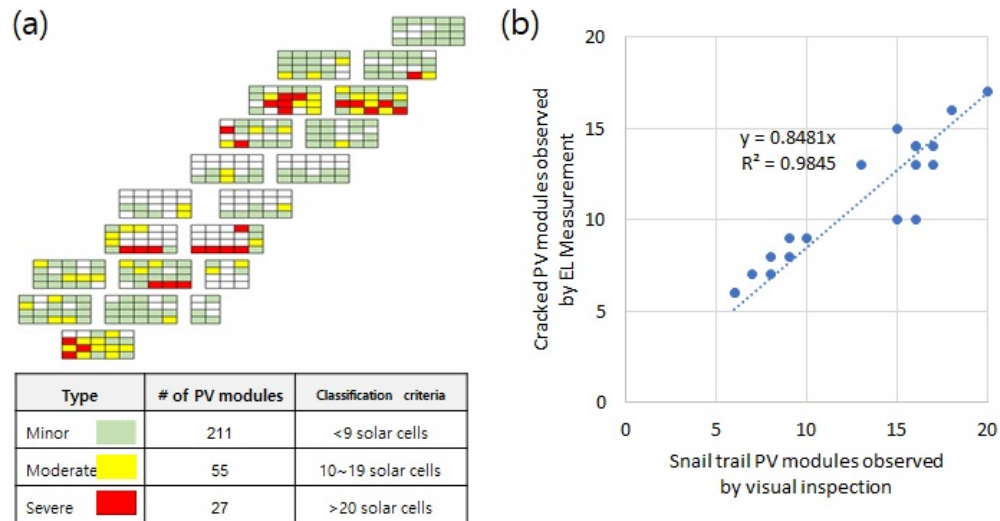
육안검사는 Fig. 2와 같이 모든 모듈의 snail trail 형태를 스케치하여 위치와 모듈단위의 심각도로 구분하여 표시하였다.



**Fig. 2** Snail trail image, (a)visual inspection sketch and (b) EL measurement of the same PV module in Fig. 1

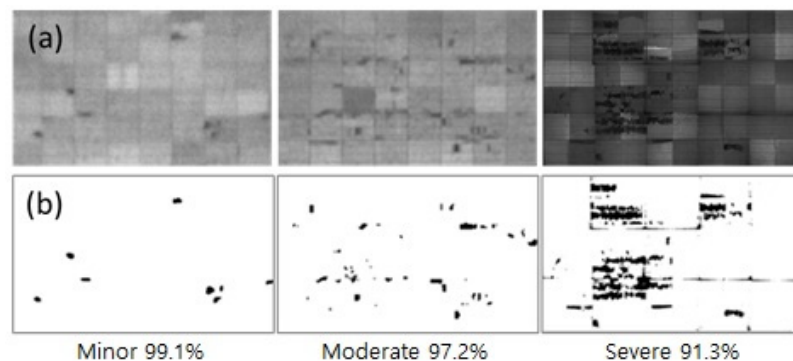
### 3.2 EL 분석

모든 모듈의 EL 측정을 수행하였고, 동일한 스트링에서 육안검사와 EL로 구분되어진 모듈의 심각도로 매칭을 한 결과는 Fig. 3과 같다. 육안검사로 snail trail이 발견된 모듈의 대부분은 크랙을 수반하였다. 또한, 발전소 내 특정 위치에서 snail trail이 심각한 모듈이 발견되었다.



**Fig. 3** Snail trail classification, (a) Mapping and (b) Comparison of number of cracked PV modules in a PV string between visual inspection and EL

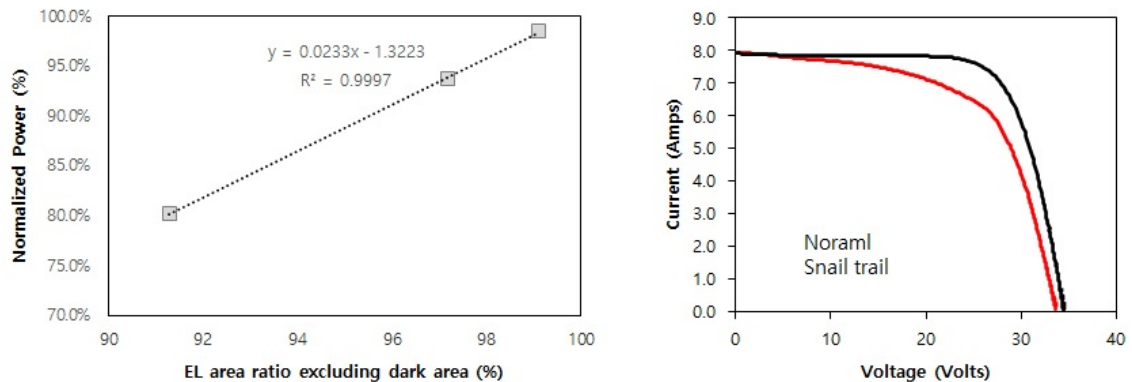
EL 측정 기법은 정성적인 태양전지의 결함을 분석하는 방법이다. 본 논문에서는 측정된 EL 이미지의 암영역을 이미지 추출하여 암영역을 제외한 면적을 계산하여 전체 모듈의 면적에서 비율로 표현하였고, 그 결과는 Fig. 4와 같다.



**Fig. 4** EL image and dark area extracted from EL image, (a) EL image (b) extracted image

EL 측정 기법은 정성적인 태양전지의 결함을 분석하는 방법이나 면적과 출력의 상관관계를 분석하여 정량적인 출력 손실을 분석하기 위해 측정된 EL 이미지의 암영역 제외한 면적비와 개별 모듈의 표준상태 I-V 측정 후 초기 대비 출력비와의 상관관계를 비교하였다. 3가지 심각도 단계로 대표된 모듈의 면적비와 출력비는 Fig. 5와 같이 선형적으로 일치한 결과를 보인다. 정성적인 분석 방법이지만, Potential Induced Degradation (PID)가 발생한 태양광 모듈의 EL 이미지로 출력 손실을 분석한 결과 3% 이내 RMSE 수준의 정확도를 발표한 연구 결과도 있다<sup>7)</sup>.

실제 크랙에 의해 태양전지의 특성이 저하되고, 전류, 전압, FF, 출력 등의 파라미터가 변하게 된다. 이러한 파라미터들은 태양전지와 모듈의 직렬 연결에 의해 실제 발전소에서 측정된 I-V 데이터의 최소 단위인 스트링 파라미터들과 연계해서 비교하는데는 무리가 있다. 그러나 육안으로 snail trail이 발견되고, 이를 확인하기 위해 EL을 측정한 결과로부터 대략적인 출력 손실을 유추하는데 활용할 수 있다.



**Fig. 5** Comparison of area ratio excluding dark area and power of PV modules at STC, I-V curve of normal and severe power loss PV module

### 3.3 I-V 분석

Figs. 1, 3의 심각한 손실이 발생한 모듈을 분리하여 정상 모듈과 I-V 측정한 결과는 다음과 같다. 약  $920 \text{ W/m}^2$ 의 경사 일사량과 약 50도 정도의 모듈온도의 환경에서 측정이 수행되었다. IEC 62446-1에서는 I-V curve 모양 해석을 정의하고 있다. 6가지로 커브의 개형을 구분하여 각각의 원인을 설명하고 있다. 그래프 개형의 3-6번에 해당하는 low Voc, rounder knee, reduced slope in vertical leg, increased slope in horizontal leg 형태가 관찰된다. 심각한 셀 크랙을 동반한 snail trail 발생한 모듈은 낮은 전압, FF 손실, 셀의 미스매치 등에 의해 복합적인 손실이 관찰되었다.

전체 모듈을 접속반에서 스트링 단위 I-V는  $800 \text{ W/m}^2$  이상의 일사량 조건에서 측정하였다. IEC60891의 표준상태 환산조건을 이용하여 스트링의 출력을 변환하였다. 온도변환 계수  $\alpha$ 는 0.041,  $\beta$ 는 -0.33,  $\gamma$ 는 -0.46 사용하였다. 전체 스트링에서 파라미터의 손실은 다음의 Fig. 6 같다. 스트링 출력의 합은 91%, 평균 전압은

95.3%, 평균 전류 95.4%, 평균 Voc 98%, 평균 Isc 95.6%로 계산되었다. 최소 및 최대 손실 스트링의 경우 초기 대비 약 95.7%, 84.8%로 수준이고, 5년 운영된 발전소의 연간열화율을 0.8%로 산정한 경우 약 4% 이내 출력 손실을 감안한다면, 모든 스트링이 4% 이상의 출력 손실이 발생하였다.

Snail trail의 발생 원인은 모듈의 제품 불량, 운송, 시공, 구조물 지반 침하에 의한 뒤틀림 등 복합적인 요인에 발생할 수 있고, 본 발전소의 경우 이해관계자들의 의견 충돌의 소지가 있으므로 원인에 대해서 다루지 않겠다.

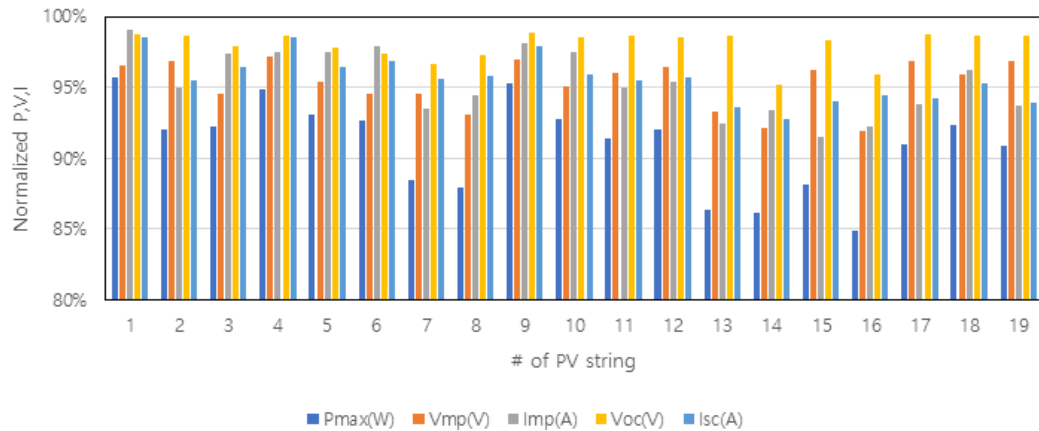


Fig. 6 Normalized Pm, Vm, Im, Voc, Isc of PV string

#### 4. 결론

95 kW급 태양광 발전소에서 발생한 snail trail 현상에 대해 육안검사, I-V, EL 등의 측정을 통해서 고장 분석을 수행하였다. 다결정 태양광 모듈은 설치 이후 5년 운영되었고, 전체 모듈 380개 중 78%에서 육안검사로 snail trail이 관찰되었다. EL 측정 결과로 대부분 크랙을 수반하였고, 모듈의 출력은 최대 약 18%의 손실이 발생되었다. 스트링 단위 출력은 최저 4.3%에서 최대 15.2% 손실이 발생하였고, 전체 시스템의 발전량 손실은 약 9.0%로 추정된다. Snail trail 현상은 육안으로 쉽게 확인이 가능하지만, 육안검사 미시행으로 발전소 가동 후 수년이 지나 심각한 발전량 손실이 발생할 때 확인되는 사례가 빈번하다. 태양광 모듈의 열화 및 고장에 의한 발전량 손실을 줄이기 위해 정기적인 점검과 원인 파악 후 문제 해결을 체계적으로 진행할 필요가 있다.

#### 후기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다(No. 20193020010390).



## REFERENCES

1. Richter, S., Werner, M., Swatek, S., and Hagendorf, C., Understanding the Snail Trail Effect in Silicon Solar Modules on Microstructural Scale, In 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, pp. 3439-3441, 2012.
2. Meyer, S., Richter, S., Timmel, S., Gläser, M., Werner, M., Swatek, S., and Hagendorf, C., Snail Trails: Root Cause Analysis and Test Procedures, Energy Procedia, Vol. 38, pp. 498-505, 2013.
3. Meyer, S., Timmel, S., Richter, S., Werner, M., Gläser, M., Swatek, S., and Hagendorf, C., Silver Nanoparticles Cause Snail Trails in Photovoltaic Modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 121, pp. 171-175, 2014.
4. Dolar, A., Leva, S., Manzolini, G., and Ogliari, E., Investigation on Performance Decay on Photovoltaic Modules: Snail Trails and Cell Microcracks, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, No. 5, pp. 1204-1211, 2014.
5. Duerr, I., Bierbaum, J., Metzger, J., Richter, J., and Philipp, D., Silver Grid finger Corrosion on Snail Track Affected PV Modules – Investigation on Degradation Products and Mechanisms, Energy Procedia, Vol. 98, pp. 74-85, 2016.
6. MJB Service, MJB PV-Module Judgment Criteria, Vol.3.1, MJB Services GmbH, Hamburg, Germany, 2014.
7. Bedrich, K. G., Luo, W., Pravettoni, M., Chen, D., Chen, Y., Wang, Z., and Wang, Y., Quantitative Electroluminescence Imaging Analysis for Performance Estimation of PID-influenced PV Modules, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 8, No. 5, pp. 1281-1288, 2018.