

## 결정질 태양전지 crack 패턴에 따른 전기적 특성 모델링

송영훈<sup>a1</sup>, 강기환<sup>a</sup>, 유권종<sup>a</sup>, 안형근<sup>1</sup>, 한득영<sup>1</sup>

건국대학교<sup>1</sup>(derick@kier.re.kr), 한국에너지기술연구원<sup>a</sup>(kskim@kier.re.kr)

### The modeling of electrical characteristics with crack pattern in crystalline solar cell

Song, Young-Hun<sup>a1</sup>, Kang, Gi-Hwan<sup>a</sup>, Yu, Gwon-Jong<sup>a</sup>,  
Ahn, Hyung-Gun<sup>1</sup>, Han, Deuk-Young<sup>1</sup>

KonKuk University<sup>1</sup>(derick@kier.re.kr)  
Korea Institute of Energy Research<sup>a</sup>(kskim@kier.re.kr)

#### Abstract

---

In this paper, we analyzed the electrical characteristics with crack pattern in crystalline solar cell. crystalline solar cells with a thin substrate, even small shocks can be easily damaged. Before the module goes through many processes, because the solar cells are at risk of a crack.[1] That occurred early in the PV module micro-crack is not easily detection by eye test or output test. Because the EL (Electroluminescence) device has been detected using. PV module is made by laminated of a variety of materials. By different properties of each material will affect the crack. For this reason, the crack will grow and affect the output. And We analyzed the three crack patterns in crystalline solar cell.

A growth of cracks on crystalline solar cell was interpreted by analysing generated cracks on the PV modules. Based on this interpretation, an electrical output value was calculated by mathematical modeling on electrical output characteristic with each crack patterns.

Key words : 미세 균열(Micro crack), 기계 하중 시험(Mechanical Load Test), 균열 형태(crack pattern)

---

## 기 호 설 명

$L$	: 길이 팽창
$S$	: 면 팽창
$A_{defect}$	: 비활성 영역

## 1. 서 론

태양광 발전의 핵심 소자는 광전효과(Photovoltaic effect)를 이용하여 태양에너지를 바로 전기 에너지로 변환하는 태양전지(Solar Cell)이며, 이러한 태양전지는 소재와 제작 방식에 따라 여러 종류가 있다. 하지만 아직도 전체 태양광 발전의 90%이상은 결정질 태양전지가 차지하고 있다.

200 $\mu\text{m}$  내외의 얇은 기관으로 여러 단계의 공정을 거쳐 제작되어지는 태양전지는 작은 충격에도 쉽게 파손될 수 있으며 더욱이 PV 모듈 공정이 진행되는 동안 그 위험성은 증가한다. 또한 외부에 노출되어 눈, 비, 바람, 우박과 같은 환경요인에 의한 기계적 스트레스와 온도 차에 의한 열적 스트레스도 또 다른 파손의 요인이 되고 있다.

PV모듈의 핵심 소자인 태양전지가 파손에 의한 crack을 내포하고 있다면 모듈의 회로 구조상 출력 부정합(mismatch)으로 인해 단일 모듈은 물론 시스템 전체적으로 출력 저하를 가져오며, 열화 현상으로 모듈의 내구성 저하 및 화재 발생 등의 추가적인 문제를 일으켜 모듈 수명을 단축시키게 될 것이다.

따라서 본 논문에서는 결정질 태양전지에 생성된 crack을 분석하여 crack의 성장에 대해 탐구해 보고, crack 패턴에 따른 전기적 출력 특성을 수식화 함으로써 전기적 출력 값 예측이 가능하도록 제시 하고자 하였다.

## 2. 본 론

태양전지 crack의 성장과 패턴에 따른 전

기적 특성에 대한 이론적 배경 및 모델은 다음과 같다.

### 2.1 태양전지 crack의 성장

결정질 태양전지는 물리적 충격에 매우 약하고 전기적 출력이 낮기 때문에 직·병렬 회로를 구성 후 사용자의 용도 및 설치 장소에 따라 다양한 재료가 복합적으로 사용되어 PV모듈로써 제작되어진다. 모듈에는 태양전지의 전면을 보호하기 위해 투명한 저 철분 강화 유리가 사용되고, 모듈의 후면에는 Back-sheet, 그리고 태양전지와외의 중간층에는 소재들의 상호 결합, 내구성을 높이기 위해 EVA-sheet가 사용된다.

즉, Glass/EVA/Solar Cell/EVA/Back-sheet의 형태로 적층된 태양전지는 진공상태에서 열·압축·봉합(Lamination process)된다. 여기에 알루미늄 프레임과 정션 박스, 케이블이 적용되어 단일 모듈로써 제작되어진다.

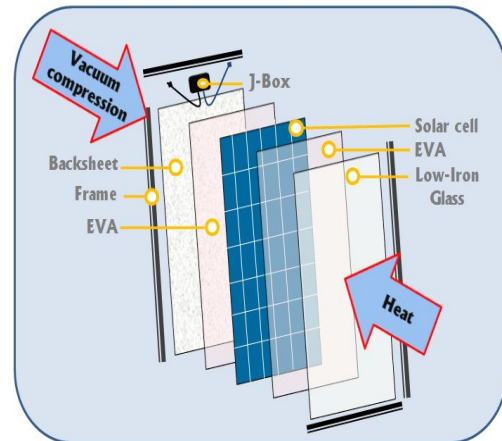


그림 1. PV모듈 구조

태양전지에서 모듈로 여러 단계의 공정이 진행되는 동안 물리적 충격에 의해 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지는 육안으로 식별이 어렵고 전기적 출력도 안정적이어서 모듈로 완성되어 사용자에게 공급된다.

하지만 옥외에 노출되어 발전을 수행하는 동안 지속적인 열적 스트레스로 인해 crack으로 성장하여 금속전극이 끊어지고 조각으로 분리 될 것이다. 이것은 PV모듈이 여러 재료로 이루어진 복합체로써 재료들의 온도에 의한 물성이 서로 다르기 때문일 것으로 여겨진다.



그림 2. 온도 변화에 따른 crack의 성장

모든 물질은 단위 길이 1[m]에 대해 1[°C] 온도 상승 시 길이가 팽창되는 정도의 크기를 정해 놓은 고유 선팽창 계수를 갖고 있다.

따라서 PV모듈에 사용된 모든 재료들은 각기 다른 팽창 계수로 인해 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지에 영향을 주게 될 것이다.

아래 식 (2.1)과 (2.2)는 길이 팽창과 면 팽창에 관한 식이다.

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2.1)$$

위의 식에서  $L_0$ 는 팽창 전 길이,  $\alpha$ 는 선팽창 계수,  $\Delta T$ 는 온도 변화량을 나타낸다.

$$S = S_0(1 + 2\alpha\Delta T) \quad (2.2)$$

또한 위의 식에서  $S_0$ 는 팽창 전 길이,  $\alpha$ 는 면 팽창 계수,  $\Delta T$ 는 온도 변화량을 나타낸다.

## 2.2 태양전지 crack 패턴에 따른 전기적 출력 예측

결정질 태양전지의 금속전극은 발생된 전하(charge, 전자와 홀)를 수집하여 외부도선인 리본 전극과 이어주는 도선으로 주로 Ag, Al, Ag:Al 등이 사용되고 있다. 태양전지의 전면에 80~100[ $\mu$ m] 내외로 고르게 분포되어 그림 3.에서와 같이 실선이 finger 전극이고, finger 전극과 수직으로 맞닿은 굵은 선이 busbar 전극이다. PV 모듈은 전압이 낮은 태양전지를 직렬회로로 구성하여 전하를 수집하게 되는데 이것은 마치 건전지의 (+)와 (-)를 접속하는 것처럼 태양전지 전면 busbar 전극과 다음 태양전지의 후면 busbar 전극에 배선재료인 리본 도선을 붙여 연결한 것과 같다.

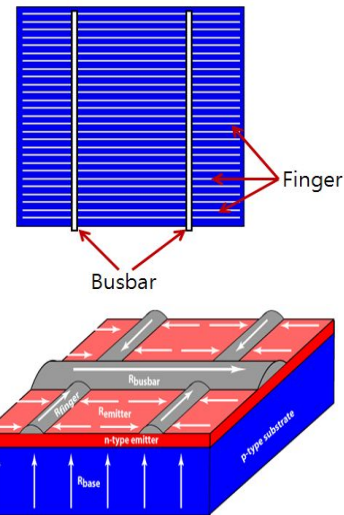


그림 3. 태양전지의 금속전극 패턴

그렇기 때문에 busbar를 기준으로 태양전지 측면부의 finger 전극이 끊어지고 전지가 조각으로 분리된다면 전하가 전극을 따라 수집 될 수 없으므로 그 부분은 비활성 영역으로 남겨지게 되어 광 생성 전류가 면적에 비례하여 줄게 될 것이다. 위와 같이 태양전지에 발생한 crack에 의해 면적으로 분리되는 경우

를 가정하여 수학적 모델링을 유도해 보았다.

### 2.2.1 A type crack

A type crack은 그림 4.와 같이 A 영역에서 finger 라인과 평행한  $x$ 축 방향으로 발생된 crack으로 정의 하였다.

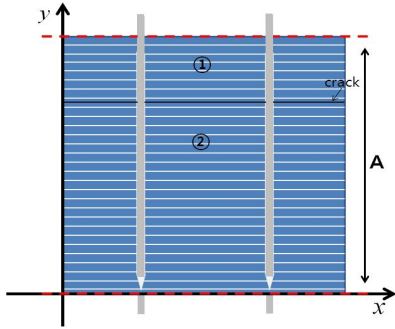


그림 4. A type crack 모델

A type은 crack이 finger 전극과 평행하고 busbar 전극과 수직으로 발생하였을 경우 ①번과 ②번 영역으로 분리될 것이다. 하지만 finger 전극을 따라 모인 전하들은 모듈화 공정에 의해 busbar 전극과 붙어있는 외부 도선인 리본 도선을 따라 ①번 영역과 ②번 영역에서 각각 수집된 전하들이 원활히 이동하게 될 것이다. 즉, 리본도선에 의해 태양전지는 병렬회로가 되어 전압은 일정하게 유지되고, 전류는  $I_{①} + I_{②} = I_{out} = I_{total}$ 과 같게 되어 출력에는 큰 변화가 없을 것이다.

그림 5.는 A type crack에 대한 병렬관계를 등가회로로 도식화 한 것이다.

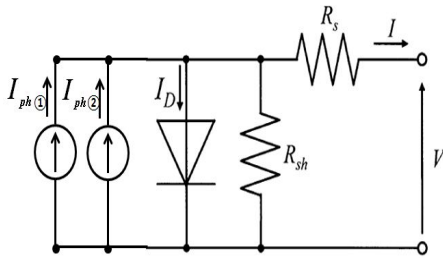


그림 5. A type crack 패턴의 등가회로

정상 상태의 태양전지의 등가회로 식은 아래 식 (2.3)과 같다.

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \frac{q(V + R_s I)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

하지만 병렬 등가회로를 고려한 식은 (2.4)와 같이 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (I_{ph①} + I_{ph②}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

여가서 광 생성전류  $I_{ph}$ 는 전류밀도  $J$ 와 태양전지 면적  $A$ 의 곱으로 구해진다.

$$I_{ph} = JA \quad (2.5)$$

A type crack에서 총 태양전지 면적  $A$ 는  $A = A_{①} + A_{②}$  이다.

따라서 식(2.4)에서의  $I_{ph}$ 를  $J$ 와  $A$ 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (JA_1 + JA_2 - JA_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

$$I_{out} = J(A_1 + A_2 - A_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

$$I_{out} = J(A - A_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

여기서  $A_{defect}$ 는 crack이 발생하면서 생겨난 작은 결점 영역을 의미하며, 식 (2.8)에서 볼 수 있듯이 A type crack의 경우 태양전지의 전체 면적에서 미세 결함 면적만이 빠지므로 출력에는 큰 영향이 미치지 않을 것으로 판단된다.

### 2.2.2 B type crack

B type crack은 [그림 3.6]과 같이 B영역, 즉, busbar 전극을 기준으로 전지의 측면에서  $y$ 축과 평행한 ①영역에서 생성된 crack과 busbar와 busbar 사이의 ②영역에서 부분 영역으로 발생된 crack을 정의 하였다. B type의 경우는 전체 태양전지 면적에서 crack으로 분리된 비활성 영역만큼을 빼주는 아래와 같은 식으로 유도하였다.

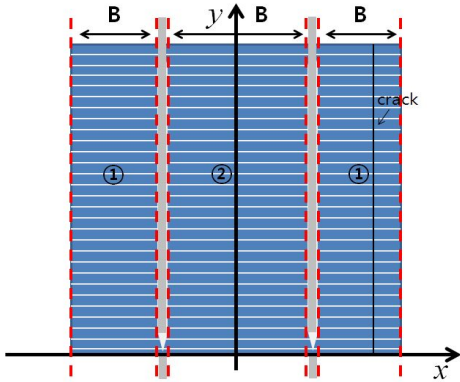


그림 6. B type crack 모델

B type과 같이 crack이 발생하였을 경우에는 식 (2.9)와 같이으로 유도 할 수 있다.

$$I_{out} = (I_{ph(total)} - I_{ph(defect)}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

즉, 정상 태양전지의 광 생성 전류  $I_{ph}$ 의 값에서 비활성 결함 영역의 광 생성 전류  $I_{ph}$ 만큼 빠지게 되는 것이다.

식 (2.9)에서의  $I_{ph}$ 를  $J$ 와  $A$ 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (JA_{total} - JA_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

$$I_{out} = J(A_{total} - A_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

위의 식과 같이 B type의 crack이 생성된 태양전지는 비활성 결함 영역을 제외한 정상  $A_{normal}$ 에서의 등가회로 식이 되는 것이다.

$$I_{out} = J(A_{normal}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

B type은 crack으로 인해 비활성 영역으로 분리되는 면적에 비례하여 광 생성 전류량이 줄어들게 될 것이다.

### 2.2.3 C type crack

C type crack은 그림 7.과 같이 태양전지 사선 방향으로 발생된 crack을 정의 하였다.

C type은 태양전지에 사선으로 crack이 발생할 경우 finger 도선이 끊어져 전하가 busbar까지 이동하지 못해 busbar 전극을 기준으로 바깥영역의 finger 전극과 삼각형 형태의 면적만큼 출력이 저하될 것으로 여겨진다.

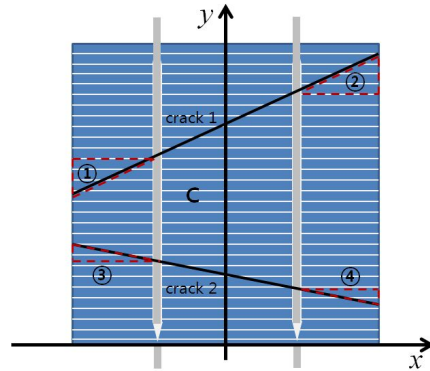


그림 7. C type crack 모델

이때, 삼각형의 비활성 영역 면적은 벡터 (vector) 외적을 이용하여 다음과 같이 낼 수 있다.

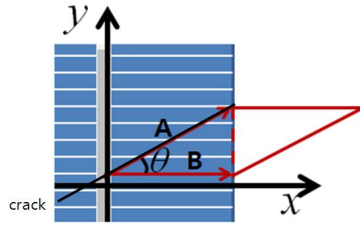


그림 8. 벡터의 외적을 이용한 C type crack의 면적 계산

그림에서와 같이 두 벡터  $A$ ,  $B$ 의 벡터 곱  $A \times B$ 의 크기  $|A \times B| = AB \sin \theta$ 는 한변의 길이  $A$ 에 그 높이  $B \sin \theta$ 를 곱한 것과 같으므로 결국  $|A \times B|$ 는  $A$ 와  $B$ 로 이루어지는 평행사변형의 면적을 의미한다.[2] 이때 평행사변형의 면적을 이등분 하면 구하고자 하는 삼각형의 면적  $A$ 를 식 (2.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{\|A\| \|B\| \sin \theta}{2} \quad (2.13)$$

정상 태양전지의 광 생성 전류  $I_{ph}$ 에서 비활성 결합 영역의 광 생성 전류  $I_{ph}$ 만큼을 빼면

$$I_{out} = (I_{ph(total)} - I_{ph(defect)}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

와 같다. 위의 식  $I_{ph}$ 를  $J$ 와  $A$ 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다. 비활성 영역의 면적  $A$ 는 식 (2.13) 벡터에 의한 수식을 대입하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{out} = J \left\{ A_{total} - \left( \frac{\|A\| \|B\| \sin \theta}{2} \right) \right\} - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.14)$$

$$I_{out} = J(A_{total} - A_{defect}) - I_0 \left[ \exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

C type의 사선 crack도 비활성 영역의 면적에 비례하여 광 생성 전류가 감소하게 된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지가 PV모듈로서 옥외에 노출되었을 때 crack으로 성장하게 되는 원인에 대해 탐구해 보고, crack 성장에 따른 전기적 출력 특성을 수식으로써 모델링 하고자 하였다.

모듈에서 태양전지의 micro-crack은 태양전지 모듈의 재료 특성상 각기 다른 물성을 지닌 재료들의 팽창계수로 인해 crack으로 성장 하여 금속 전극이 끊어지고 조각으로 분리될 것이다. 또한, 태양전지에서 생성된 전하들은 전·후면 금속 전극을 따라 수집 되는데 전면 금속 전극과 crack의 상호 패턴에 따라서 전하의 수집량이 달라진다. 따라서 본 논문에서는 crack을 방향 및 면적에 기인하여 세 가지 패턴으로 분석하여 모델링을 제시 하였다. 이렇게 수식된 모델링들은 crack에 따른 전기적 출력을 예측하는데 도움이 되리라 기대되어진다.

향후 진행되는 연구에서는 실증을 통해 모델링을 보완·수정해 나가겠다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 20113010010010-11-1-000)

#### 참 고 문 헌

1. M.Kontges, I.Kunze, S.Kajari-Schröder, X.Breitenmoser, B. Bjørneklett "The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic module due to micro-cracks", Solar Energy Materials & Solar cell, 2010.
2. 한득영, "전자기학", 도서출판 인터비전 2000