

## 단결정, 다결정 실리콘 태양전지의 전기적 특성 분석

홍창우<sup>1</sup>, 최용성<sup>1,a</sup>, 이경섭<sup>1</sup>, 조수영<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 동신대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 성화대학교 항공전기전자과

## Analysis of Electrical Characteristics for Single Crystalline and Poly-crystalline Solar Cell

Chang-Woo Hong<sup>1</sup>, Yong-Sung Choi<sup>1,a</sup>, Kyung-Sup Lee<sup>1</sup>, and Soo-Young Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Dongshin University, Naju 520-714, Korea

<sup>2</sup> Department of Aerospace Electrical and Electronic, Sunghwa College, Gangjin 527-812, Korea

(Received May 2, 2011; Revised August 17, 2011; Accepted August 29, 2011)

**Abstract:** Recently, annual usage of energy is dramatically increasing because industrialization is going faster and more electricity is needed due to various electronic devices. This study focused on the performance characteristics of solar cell using the impedance technique. The experiment measured an impedance according to frequency's from 2 mHz until 1 MHz. It could know that the impedance was decreased according to the frequency increases in solar cell. The imaginary part was changed from capacitance component to inductance component.

**Keywords:** Impedance meter, Solar cell, Frequency, Electrical characteristics, Imaginary part, Real part

### 1. 서 론

현재 우리가 주원료로 사용하는 화석에너지는 유한한 에너지원이며 환경오염 또한 문제점으로 나타나고 있다. 현재 그린에너지를 중요시하는 이 시점에서 신재생에너지원으로 태양광발전, 풍력발전, 연료전지, 바이오에너지, 소수력 등 여러 가지 에너지원이 연구 및 개발 중에 있다 [1]. 이 중 태양전지의 경우 태양이 있는 한 외부전원을 필요치 않고 발전할 수 있으며 환경오염 문제에 있어 전혀 문제점이 없는 대표적인 친환경 대체에너지원이라 할 수 있다.

태양광발전 시스템은 초기 설치비용만 고려된다면 수명이 20년 이상으로 안정적인 전원공급 장치로 사

용될 수 있고, 추가적인 비용 또한 거의 들어가지 않는 차세대 대체에너지의 핵심이다 [1]. 태양전지발전 시스템은 메가와트급의 발전량을 가진 대규모 태양광 발전소를 비롯하여 각 가정에서 태양광으로 전기를 생산하여 낮에는 남는 전기를 전기회사 계통으로 연결하여 전기를 전기회사로 팔고 밤에는 전기를 사용하는 계통 연결시스템, 전기가 들어오지 않는 지역에서 태양광으로 발전하여 축전지에 전기를 보관하여 사용하는 독립형 시스템 등 있다.

이처럼 우리생활에 있어 가장 가깝게 다가오는 대체에너지원으로 태양광발전 뿔을 수 있다 [2]. 이처럼 많은 태양광 발전시스템의 설치가 늘어남에 따라 문제점 또한 나타나고 있다. 태양광발전의 경우 넓은 부지를 필요로 하며 일사량에 의존하는 발전방식이므로 날씨에 많은 영향을 받으며 효율에 있어서 화석연

a. Corresponding author; yschoi67@dsu.ac.kr

료에 비해 효율이 떨어지는 건 사실이다. 태양전지의 효율을 감소시키는 요인에는 표면에서 빛이 반사되거나 흡수되지 않을 때 생기는 광학적 손실, 재결합 손실, 각종 저항성분에 의한 손실 등 여러 가지가 있다. 이러한 요인을 비교해 볼 때 아직까지 화석연료를 대신 할 만큼의 효율이 나오고 있지 않아 화석에너지원 주 에너지원으로 사용하는 것이 현재 실정이다 [3].

이처럼 효율 문제점을 개선하기 위해서 퍼지제어, 태양위치 추적 등 여러 방향으로 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 외부적인 조건을 통해 효율을 높이는 것도 중요하지만 내부적인 요인을 찾아 효율을 높이는 것 또한 중요하다. 이처럼 많은 연구를 통해 신재생에너지원의 장점을 부각시키고 화석에너지원에 비해 효율을 높여 화석에너지의 발전량을 줄이고 신재생에너지의 발전량을 증가하여 보다 쾌적한 환경을 만들어 나가야 할 것이다.

따라서, 본 논문에서는 태양전지의 효율을 높이기 위하여 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 전력패턴을 분석하고, 내부적 요인인 저항 성분, 캐패시터 성분, 리액턴스 성분에 대하여 연구하였다. 리액턴스의 경우 태양전지 내부의 원인이 아닌 태양광모듈과 임피던스 측정기를 연결할 때 나타난 성분이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 태양전지 동작 원리 및 임피던스 측정법

#### 2.1.1 태양전지의 원리 및 구조

태양전지는 크게 빛에너지와 열에너지로 나뉘는데 그 중 태양의 빛에너지를 이용하여 전기를 생산하는 것이 태양전지이다. 태양전지는 실리콘의 반도체 소자가 광에너지를 받아서 전기에너지로 변화하는 특성인 광기전력 효과와 광전류 효과를 이용하는 다이오드접합 구조를 갖는 반도체 소자이다 [4]. 반도체에 빛을 쏘이면 전자와 정공이 발생하여 +전극과 -전극이 형성되고 그 전극이 외부회로와 접속되어 있으면 전류가 흐르게 된다. 태양광발전 방식은 외부전원을 따로 필요치 않고 자연적인 요인으로 전력을 생산한다. 그림 1은 태양전지의 기본구조 및 동작 원리를 나타내고 있다.

태양전지의 전압의 세기는 여러 장의 태양전지를 직렬로 연결시켜 조정하며, 전류의 세기는 병렬연결이나 모듈의 면적으로 조정할 수 있다. 태양전지의 전기적 특성

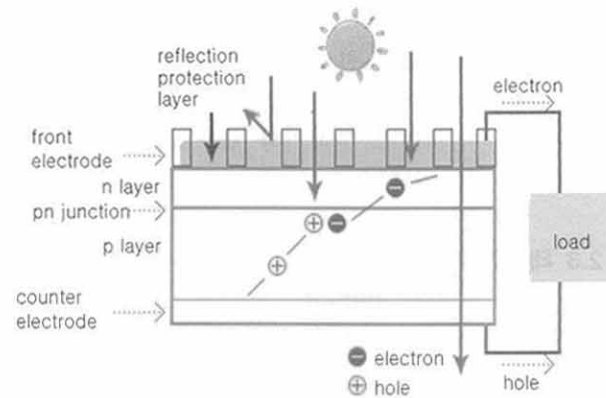


Fig. 1. Basic structure and principle of solar cell.

을 결정하는 요소를 보면 내부적인 변수로서 내부 직렬 저항, 내부 병렬저항 그리고 다이오드포화전류이고, 외부적인 변수로서는 일사량과 온도의 변화 등이 있다 [5]. 내부 직렬저항은 태양전지에 광전류가 흐를 때 이 전류의 흐름을 방해하는 저항 값으로는 N층의 표면저항, P층의 기판저항, 전극 접촉저항 및 전극자체의 고유저항 등이 포함되어 있다.

### 2.2 임피던스 측정법

임피던스의 정의를 간단히 내리면 임피던스는 교류 신호의 흐름을 방해하는 저항이다 [6]. 단어의 의미로는 '저항'과 큰 차이가 없다. 임피던스에 있어서 실수 성분과 허수성분으로 나눌 수 있다. 실수성분은 저항 성분이고 허수성분은 리액턴스를 나타낸다. 그림 2는 허수부와 위상의 관계를 나타내고 있다.

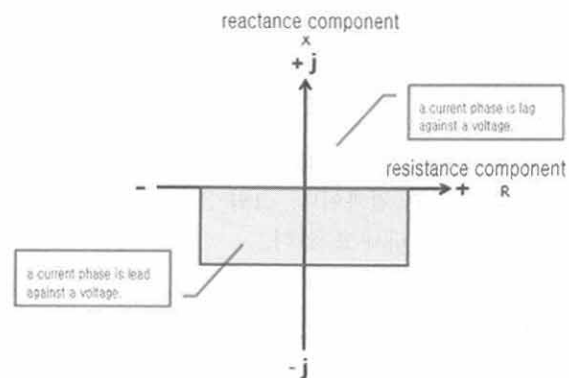


Fig. 2. Relationship between the imaginary and the phase.

임피던스가  $+j$ 인 영역에 있을 때는 전압에 대해 전류의 위상이 지연되고 반대로  $-j$ 의 영역에 있을 때는 전압에 대해 전류의 위상이 앞선다. 그림 3은 본 실험에 사용된 임피던스 분석기와 단결정, 다결정 태양전지를 나타내고 있다.

### 2.3 태양전지

표 1은 본 실험에 사용된 단결정, 다결정 태양전지의 사양을 나타내고 있다. 단결정 태양전지의 개방전압은 21.6 V이고, 개방전류는 0.305 A이며, 최대전력은 5 W이다. 다결정 태양전지의 개방전압은 21 V이고, 개방전류는 0.33 A이며, 최대전력은 5 W이다.

Table 1. Technical data of PV.

Kinds of solar cells	Crystalline silicon solar cell	Polycrystalline silicon solar cell
Open circuit voltage	21.6 V	21 V
Open circuit current	0.305 A	0.33 A
Peak power	5 W	5 W
Peak voltage	17 V	18 V
Peak current	0.29 A	0.277 A

이 실험의 시스템은 단결정, 다결정 태양광전지, 임피던스 측정기, 할로겐램프, 오실로스코프로 이루어져 있다. 본 실험에 사용한 태양전지의 내부저항의 정확한 측정을 위하여 임피던스 측정기와 모듈의 접속선을 최대한 짧게 하여 측정하였다. 할로겐램프와 모듈 간의 거리를 40 cm, 30 cm, 20 cm, 10 cm로 변화를 주며 측정된 조도의 세기는 40 cm 경우 121.9 lux, 30 cm 경우 210 lux, 20 cm 경우 437 lux, 10 cm 경우 515 lux가 측정되었다. 측정된 조도는 태양광 모듈의 중앙에 조사되는 빛의 세기를 측정된 결과이다. 그림 3은 태양전지와 임피던스 측정기를 나타내고 있다.

그림 4는 태양전지의 등가회로를 나타내고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 태양전지 내부에는 저항 성분과 캐패시터 성분이 존재한다. 이러한 내부저항 및 캐패시터 성분으로 인해 태양전지의 응답특성 또한 느리게 된다. 즉, 임피던스 성분들로 인해 태양전지의 효율이 떨어지게 되는 것이다.

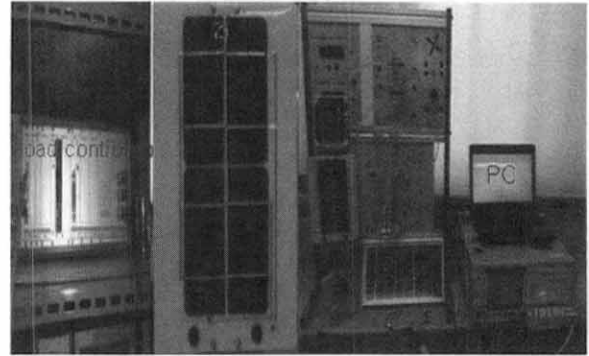


Fig. 3. Impedance meter and solar cell.

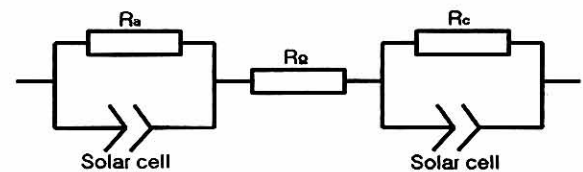


Fig. 4. Internal equivalent circuit of solar cell.

태양전지의 내부 전기적 특성의 반응식은 식 (1), (2) 및 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)은 태양전지에 의한 용량성 부분을 나타내고 있다. 식 (2)는 태양전지의 내부저항  $R_n$ 와 나머지 임피던스를 나타내고 있다. 식 (3)은 식 (1)과 식 (2)를 합한 임피던스를 나타낸다.

$$Z_c = -\frac{j}{\omega C} \quad (1)$$

$$Z_{(w)} = R_n + \frac{1}{\frac{1}{R_a} - \frac{\omega C_a}{j}} + \frac{1}{\frac{1}{R_c} - \frac{\omega C_c}{j}} \quad (2)$$

$$Z_{(w)} = R_n + \frac{R_a}{1 + (\omega C_a R_a)^2} + \frac{R_c}{1 + (\omega C_c R_c)^2} - j \left[ \frac{\omega C_a R_a^2}{1 + (\omega C_a R_a)^2} + \frac{\omega C_c R_c^2}{1 + (\omega C_c R_c)^2} \right] \quad (3)$$

본 실험에 쓰인 태양전지는  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  크기의 단결정 Si 태양전지이다. 먼저, 외부 저항에 따른 단결정 실리콘 태양광 전지의 출력 전압 및 전력을 측정하기 위하여 태양전지와 가변저항을 직렬 연결하였다. 그리고 전류계를 가변저항과 직렬 연결하고 전압계를 병렬 연결하여 외부저항에 대한 전류와 전압을

측정할 수 있도록 하였다. 광원은 230 V, 100 W의 할로겐램프를 사용하였으며 가변저항의 조정범위는 100 Ω, 50 Ω, 20 Ω, 10 Ω, 5 Ω, 3 Ω, 2 Ω, 1 Ω, 0.5 Ω, 0.3 Ω이다. 동일한 거리에서 가변저항을 이용하여 저항을 변화시켜가며 출력 전압과 전류를 측정 후,  $P=VI$  라는 식을 이용하여 출력 전력을 측정하였다.

표 2는 실험에 사용된 장치 사양을 나타내고 있다. 또한, 태양전지와 광원 사이의 거리를 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm로 변화를 주었다. 각 거리에서 외부저항 값을 바꾸어 가며 측정함으로써 거리에 따른 단결정 실리콘 태양광 전지의 출력 전압 및 전력을 측정하였다. 이 밖의 측정 조건은 온도 29℃, 습도 18%를 유지하였다. 조도는 태양전지 중심에서 측정하였으며, 태양전지와 광원 사이의 거리가 20 cm일 때는 330 lux, 30 cm일 때는 132 lux, 40 cm일 때는 99 lux, 50 cm일 때는 53 lux이었다.

Table 2. Technical data of solar cell.

PV equipments	
Size (W×H×L) [mm]	200×297×100
Terminal voltage [V]	2.2
Short current [mA]	1,200
Variable resistor	
Size (W×H×L) [mm]	100×297×100
Variable resistance [Ω]	0.3/0.5/1/2/3/5/10/20/50/100
	0
Other peripheral units	
Voltmeter	moving coil type class 0.5
Ammeter	moving coil type class 0.5
Halogen lamp [W]	100

### 3. 결과 및 고찰

그림 5는 태양전지에 빛의 세기가 515 [lux]일 때 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 전기적 특성을 나타낸 결과이다. 주파수 변화를 0.02 Hz에서 1 MHz까지 변화시키며 측정하였다. 주파수가 0.02 Hz에서 0.186 Ω이 측정되었으며, 2 Hz에서는 0.23 Ω이 측정되었고, 1 MHz에서는 1 Ω이 측정되었다.

그림 6은 태양전지에 빛의 세기가 437 lux일 때 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 전기적

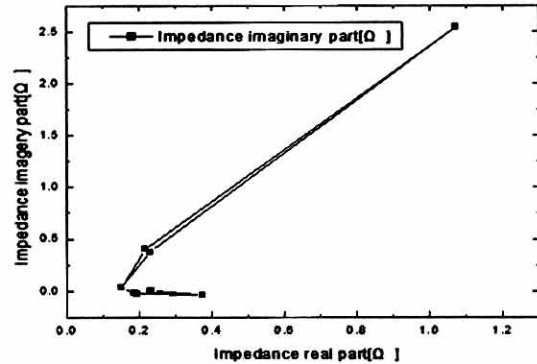


Fig. 5. Solar cell electrical characteristics of frequency variation at 515 lux.

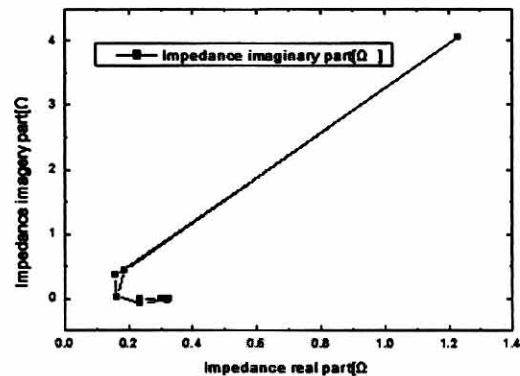


Fig. 6. Solar cell electrical characteristics of frequency variation at 437 lux.

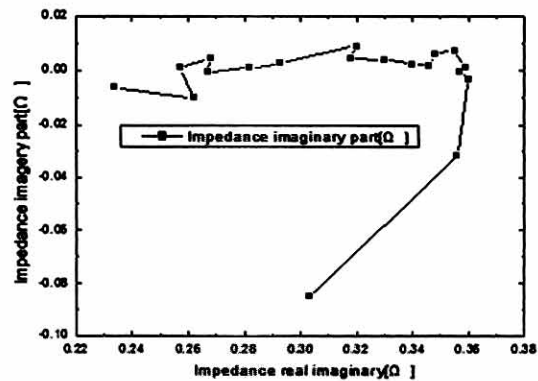


Fig. 7. Solar cell electrical characteristics of frequency variation at 210 lux.

특성을 나타낸 그림이다. 주파수 변화를 0.02 Hz에서 1 MHz까지 변화를 주면 측정하였다. 주파수가 0.02 Hz에서 0.237 Ω이 측정 되었으며 2 Hz에서는 0.324 Ω이 측정되었고 1 MHz에서는 1.23 Ω이 측정되었다.

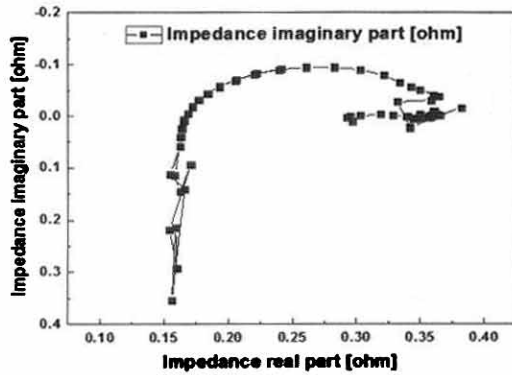


Fig. 8. Solar cell electrical characteristics of frequency variation at 121.9 lux.

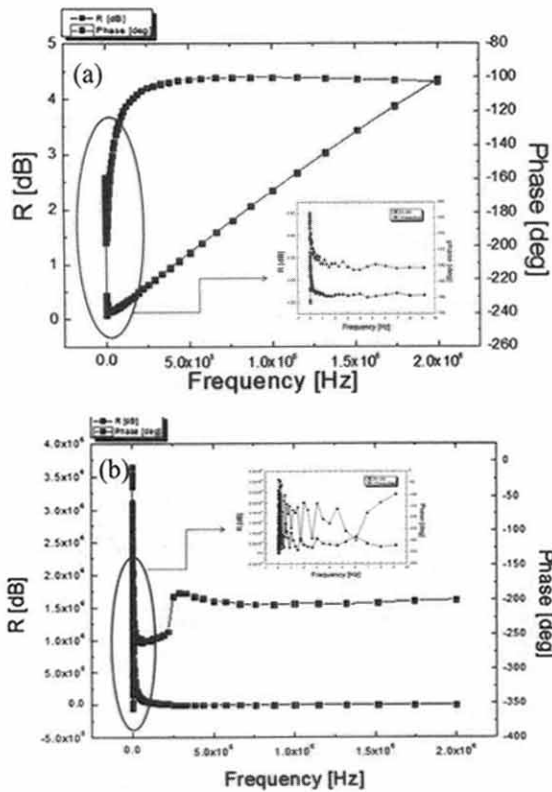


Fig. 9. Solar cell electrical characteristics of frequency variation. (a) crystalline silicon solar cell, (b) polycrystalline silicon solar cell.

그림 7은 태양전지에 빛의 세기가 210 lux일 때 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 전기적 특성을 나타낸 그림이다. 주파수 변화를 0.02 Hz에서 100 Hz까지 변화를 주며 측정하였다. 주파수가

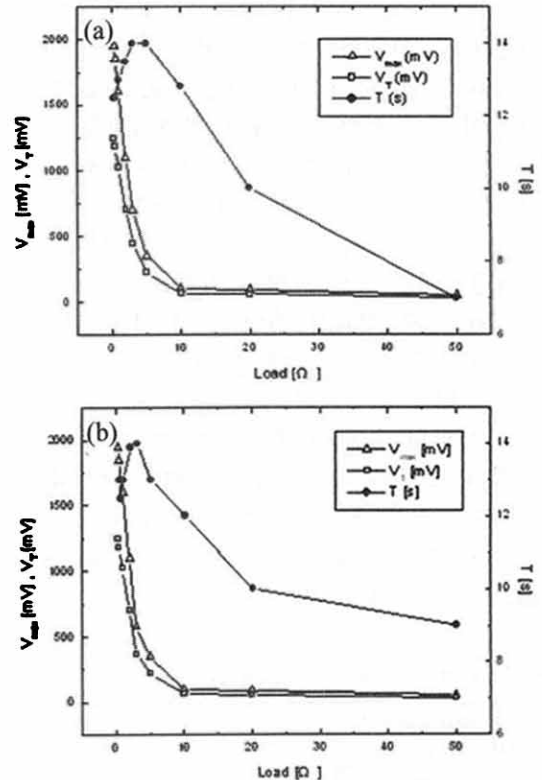


Fig. 10. The relationships between the  $V_{max}$ ,  $V_T$ , load and time constant of solar cell charge curve. (a)  $V_{max}$ ,  $V_T$ , time constant according to load for crystalline silicon solar cell, (b)  $V_{max}$ ,  $V_T$ , time constant according to load for polycrystalline silicon solar cell.

0.02 Hz에서 0.234  $\Omega$ 이 측정되었으며 3 Hz에서는 0.359  $\Omega$ 이 측정되었고 100 Hz에서는 0.303  $\Omega$ 이 측정되었다.

그림 8은 태양전지에 빛의 세기가 121.9 lux일 때 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 전기적 특성을 분석한 결과이다. 주파수 변화를 0.02 Hz에서 100 Hz까지 변화를 주며 측정하였다. 주파수가 0.02 Hz에서 0.15  $\Omega$ 이 측정되었으며 100 Hz에서는 0.28  $\Omega$ 이 측정되었다.

그림 9는 단결정, 다결정 태양전지에 빛의 세기가 121.9 lux일 때 임피던스 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 저항과 위상각 특성을 분석한 결과이다. 그림 9(a)에서 주파수가 증가함에 따라 위상각은  $-100^\circ$ 에 접근하며, 저항은 0~4  $\Omega$ 으로 접근하였다. 그림 9(b)에서 주파수가 증가함에 따라 위상각은

-200°에 접근하며, 저항은  $3.5 \times 10^6 \Omega$ 에서 0  $\Omega$ 으로 접근하였다.

그림 10은 단결정 실리콘 태양전지와 다결정 실리콘 태양전지의 전기적 특성을 비교한 결과이다. 그림 9(a)는 단결정 태양전지의 충·방전상태의  $V_{max}$ ,  $V_T$ , 저항과 시정수와의 관계를 나타낸 결과이다. 저항이 증가함에 따라  $V_{max}$ ,  $V_T$ 는 감소하였으며, 시정수는 5  $\Omega$ 까지 증가하다 저항이 5  $\Omega$  이상으로 증가시 급격하게 시정수 값이 감소함을 알 수 있다. 이는 저항이 커질수록 시정수가 줄어들어 인가전압에 좀더 빨리 도달함을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 다결정 실리콘 태양전지의 경우 단결정 실리콘 태양전지에 비해 전기적 특성이 다소 불안정한 변화를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 단결정, 다결정 실리콘 태양전지의 전기적 특성을 분석하였으며, 태양전지의 효율을 감소시키는 원인인 임피던스에 대한 연구하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 임피던스는 저주파 영역에서 고주파 영역으로 갈수록 저항이 감소함을 나타내었다.
2. 어느 일정 주파수영역에서 최소 임피던스 값을 나타낸 후 그 주파수 영역을 벗어나면 임피던스 값이 증가함을 보였다.
3. 태양전지는 반도체 소자로서 빛의 세기가 강해지면 모듈의 온도가 증가함에 따라 전도대로 전이

되는 전자가 늘어나 전도성이 좋아져 전자가 증가하여 보다 높은 효율을 나타내었다.

4. 주파수가 고주파에서 저주파로 변함에 따라 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스의 변화를 알 수 있었다.
5. 고주파 영역에서는 유도성 리액턴스의 영향으로 반원을 그리며 변화한다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20104010100380)

#### REFERENCES

- [1] T. Lambert, P. Gilman, and P. Lilienthal, *Integration of Alternative Sources of Energy* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006) p. 415.
- [2] P. Campbell and M. A. Green, *J. Appl. Phys.*, 62, 243 (1987).
- [3] S. S. Kim, D. G. Lim, D. Y. Kim, J. M. Kim, C. Y. Won, and J. S. Yi, *J. KIEEME*, 10, 1034 (1997).
- [4] W. A. Lynch and M. Salameh, *Sol. Energy*, 45, 65 (1990).
- [5] N. H. Reich, W. G. J. H. M. van Sark, W. C. Turkenburg, *Renew. Energ.*, 36, 642 (2011).
- [6] R. Garcia-Valverde, C. Miguel, R. Martínez-Béjar, and A. Urbina, *Int. J. Hydrog. Energy*, 33, 5352 (2008).