

Special  
Thema

# | 태양전지 모듈의 손실을 중심으로 한 태양광 발전시스템의 손실요인 분석

**박지홍** 겸임교수

(동양공업전문대학 전기전자통신공학부)

**강기환** 선임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

**안형근** 교수

(건국대 전기공학과)

## 1. 서론

최근 계속되는 고유가와 이로 인한 대체에너지의 관심 증가 그리고 적극적인 정부당국의 역할에 힘입어 전국적으로 태양광 발전 시스템의 보급 실적이 많은 증가세를 보이고 있다. 태양광 발전 시스템은 초기 설치 비용만 고려된다면 그 수명이 20년 이상으로 안정적인 전원 공급 장치로 사용될 수 있고, 추가적인 비용 또한 거의 들어가지 않는 차세대 대체에너지의 핵심이다. 이에 본 글에서는 태양광 발전 시스템의 보다 효율적이고 안정적인 성능을 위하여 시스템 전체에 걸쳐서 일어날 수 있는 손실 요인에 대하여 간단하게 고찰하고 태양광발전의 핵심 요소인 태양전지 모듈의 손실에 대하여 예기하고자 한다.

실리콘 반도체 등으로 구성된 태양전지에 빛이 닿으면 전기가 발생하는 현상을 이용하는 태양광 발전시스템은 환경 친화적인 무공해 발전시설로서 건설기간이 짧고 무인 자동화 운전이 가능하다는 등의 장점이 있다. 그러나 태양의 일사량에 의존하다 보니 낮은 효율로 인해 넓은 설치면적이 필요하고 야간이나 우천 시에는 발전이 되지 않으며 일사량 변동에 따른 출력의 불안정성과 고출력을 내기에는 부족한 단점을 가지고 있다. 하지만 이러한 단점을 가지고 있더라도 충분히 대체에너지의 중요한 부분으로 자리 잡고 있다.

이러한 무한 청정 에너지원인 태양에너지를 이용한 태양광 발전 시스템은 태양에너지를 전기에너지로 직접 변화시키는 태양전지를 이용하여 태양전지 모듈을 만들고 이러한 모듈을 어레이로 연결하여 태양광발전을 하게 된다. 아래의 그림1은 태양광 발전 시스템의 일반적인 구성을 보여주는 것으로 태양전지로부터 발생한 전기에너지가 PCS를 통하여 부하와 계통에 연결이 되어있다. 그리고 독립적으로 사용할 경우 발생할 수 있는 전력 부족 사태 등을 보완하기 위하여 별도의 보조전원장치를 보여주고 있다. 이러한 보조전원장치는 태양광 발전 시스템만을 독립적으로 사용하는 경우 그 효율성을 얻을 수 있겠다. 또한 부가적으로 발전량과 온도 일사량 등을 모니터링 할 수 있고 그 데이터를 저장할 수 있는 장치가 추가되어있다. 이러한 데이터 모니터링은 향후 시스템 전체의 효율 향상을

위하여 중요하게 사용할 수 있는 자료를 얻을 수 있다는 측면에서 그 중요성이 증가되고 있다.

이렇게 여러 가지 요소기술이 결합되어 운전되어 지는 태양광 발전시스템은 그 손실이 여러 부분에서 동시에 발생 하게 되며 이로 인하여 전체 손실 또한 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이에 요소별 손실 요인을 살펴봄으로써 향후 요소 부분별 손실 감소에 대하여 보다 깊이 있는 연구를 진행 할 수 있을 것이고, 나아가 태양광 시스템 전체의 효율 향상으로 이어질 수 있으리라고 여겨진다. 효율 저하의 요소를 간단히 살펴보면 태양전지 셀, 태양전지 모듈, PCS, 회로 구성 등의 물리적인 효율 감소 부분과 설치 위치나 동작 조건 등의 환경적인 요인 등을 예기 할 수 있다. 물리적인 효율 감소부분은 요소 제작 당시의 오류로 효율이 낮은 것을 포함하며, 이러한 요소들이 실제로 사용되면서 부분적인 노화와 기계 자체적인 성능감소로 인해 발생하는 손실 부분과 회로 구성에 있어서 직병렬 접속의 불균형과 최대출력 동작 점의 변화로 발생하는 손실 등이 포함된다. 환경적인 효율 감소부분은 여러 원인에 의한 일사량의 변화와 모듈 표면의 오염, 그리고 온도변화에 의한 효율 감소의 부분까지 포함되겠다.

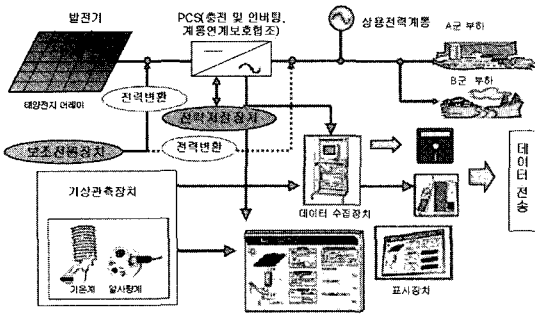


그림 1. 태양광 발전 시스템의 일반적인 구성.

## 2. 태양전지 모듈의 손실 요인

### 2.1 태양전지 셀

태양에너지로부터 직접적으로 전기에너지를 만

들어 내는 태양전지 셀은 사용재료 및 제작 방법에 따라 여러 가지가 있으나 본 글에서는 제작 당시의 성능에 관계없이 태양전지 자체의 문제로 인한 효율 감소에 대하여 고찰 하고자 한다.

그림2에서 보는 바와 같이 여러 종류의 태양전지가 개발 되어 사용되고 있다. 태양전지 셀은 기본적으로 태양의 광자에너지를 흡수 하여 전자 정공 쌍을 만들어 내는 기본적인 기능을 하는데, 태양전지 셀의 효율 감소라 함은 이러한 전자 정공 쌍이 적게 만들어 지거나 아니면 만들어진 전자 정공 쌍이 전류에 기여하지 못하고 재결합 하는데서 그 원인을 찾을 수 있다. 먼저 이러한 태양전지의 효율 감소 현상은 태양전지가 제작되는 공정에서 여러 가지 원인에 의하여 발생하게 되며, 아무리 공정기술이 뛰어나더라도 기본적인 태양전지의 효율 한계는 어쩔 수 없다. 제작당시 최고의 상태로 태양전지가 만들어 졌다고 가정하고 이러한 태양전지의 효율이 감소하는 경우를 고려하여 보면, 먼저 태양전지 자체의 성능 감소가 있었으며 이는 태양전지의 수명과 관련하여 태양전지가 자외선에 노출되면서 점차 성능이 감소하게 되고 이로 인하여 시스템 전체의 효율이 감소하는 것이다. 이러한 효율 감소를 줄이기 위하여 제작 당시 최고의 효율을 얻기 위하여 많은 연구가 진행 중이고 또한 자외선에 노출되어 수명저하가 적게 발생하도록 많은 여러 기술이 적용되고 있는 실

태양전지의 종류

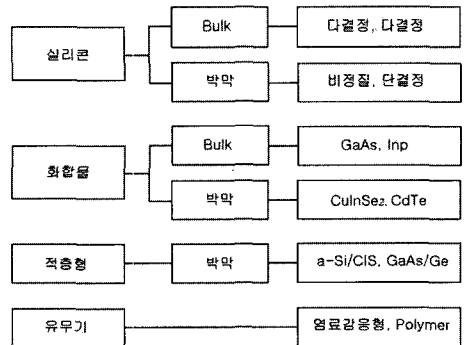


그림 2. 태양전지 종류.

정이다.

표1은 여러 태양전지 셀의 효율을 보여주는 것으로 실험실 수준의 효율과 실제 생산라인의 효율이 많은 차이를 보이고 있으며 아직 실제 생산으로 이루어지지 못하고 있는 태양전지 또한 여러 가지가 있음을 알 수 있다. 실제로 사용되는 태양전지의 비중을 2004년의 경우를 예를 들어 살펴보면 다결정 실리콘 태양전지가 전체 54.7% 단결정 실리콘 태양전지가 36.2% 비정질 실리콘이 4.4% 그리고 기타가 나머지를 차지하고 있으며 거의 대부분 실리콘 계열이 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

표1. 태양전지 종류별 효율.

종류	실험실 효율(%)	대량생산 효율(%)
단결정 실리콘	23.8	15~18
다결정 실리콘	17.8	12~14
비정질 실리콘	11.5	5~8
GaAs	25.7	17
CdTe	10.9	-
CuInSe2	14.1	-
GaAs/Gasb	34	--

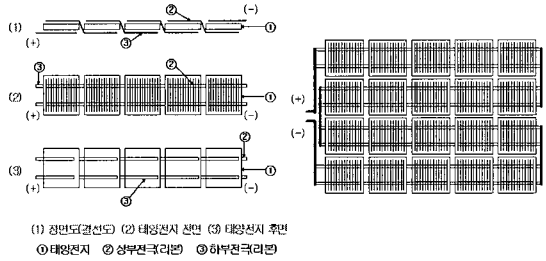
## 2.2 태양전지 모듈의 손실

### 2.2.1 태양전지 모듈

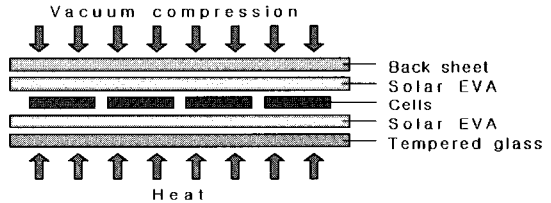
먼저 태양전지 모듈의 기본적인 내용에 대하여 살펴보자. 태양에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서는 태양전지 셀에 태양에너지가 도달할 수 있도록 태양전지를 외부에 노출시켜야 된다. 그러나 태양전지 셀을 외부에 직접 노출시킬 수 없으므로 이를 캡슐 화하여 외부에 설치하게 되는데, 이것을 태양전지 모듈이라고 한다. 그림3에 기본적인 구조가 나타나 있는데, 이는 태양전지 모듈 중 실리콘 결정형 태양전지를 사용한 모듈의 모습을 보여주고 있다.

그림3에서 보면 알 수 있듯이 태양전지를 직병렬로 연결하여 원하는 파워를 얻을 수 있을 만큼 연결한 후 모듈을 제작하게 된다. 태양전지 모듈은 외부에 장시간 노출 시켜도 그 특성이 변화하지 않도록 태양전지를 충전재(EVA Sheet)로 보호하고 그 외부는 유리나 Back Sheet를 두어 태양광이 태양전지에

최소의 손실로 들어올 수 있도록 하고 외부로부터 습기 등의 침투를 방지하게 된다.



(a) 모듈 내부의 셀 연결



(b) 모듈의 횡단면 구조

그림 3. 실리콘 결정형 태양전지 모듈의 구조.

그림4는 여러 가지 종류와 크기의 태양전지 모듈을 보여 주는 것으로 사용하는 태양전지의 종류와 특성에 따라서 모듈 화하는 과정이 달라지며 모듈의 특성 또한 유연성을 가지는 등 서로 달라진다.

그림5는 이러한 태양전지 모듈의 태양광 입사에 따른 기본적인 전류-전압 특성을 나타내는 그림으로  $V_{oc}$ 는 개방전압을 나타내며,  $I_{sc}$ 는 단락전류,  $V_{mV}$   $I_{m}$ 은 최대전력시의 전압 전류이다. 그래프의 전체 면적대비 최대 동작 점에서 면적의 비율(그림에서 사각형)이 FT(Fill Factor)에 해당하며 FT가 클수록 보다 효율적인 모듈이 되는 것을 의미한다.

### 2.2.2 태양전지 모듈의 손실요인

이러한 태양전지 모듈의 손실에 대하여 살펴보면, 크게 두 가지 정도로 나누어서 생각 할 수 있는데

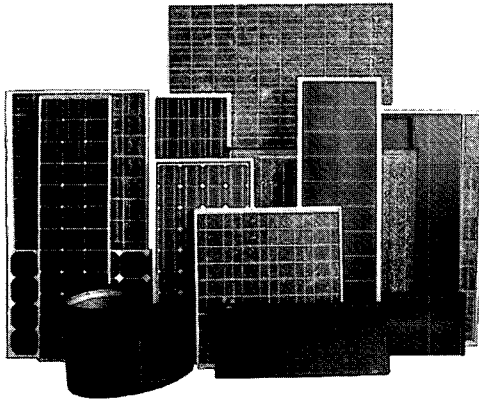


그림 4. 여러 가지 태양전지 모듈.

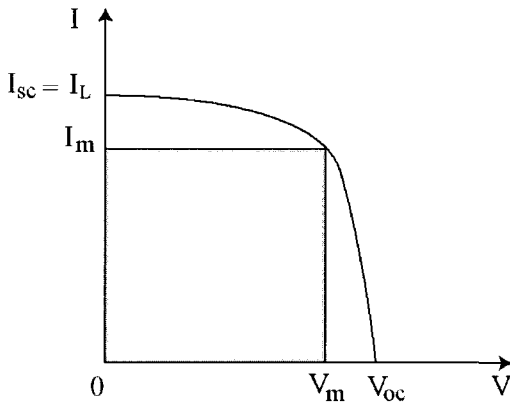


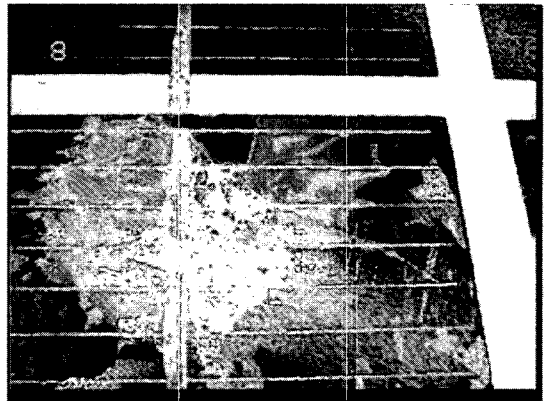
그림 5. 태양전지모듈의 전류-전압특성.

첫째, 제작 당시 유리 및 충전재 등의 사용으로 인한 투과율의 감소가 효율을 감소시키게 되고 모듈을 제작하면서 셀과 셀을 연결하면서 사용하게 되는 리본전극 자체의 저항과 전극과 셀과의 연결부위의 직렬저항 증가로 인한 효율의 감소가 발생하게 된다. 둘째, 모듈이 장시간 외부에 노출되어 발전을 하면서 내부에 사용된 충전재가 자외선에 변색되어 투과율이 점점 감소하는 현상이 나타나게 되고 전극부위에 저항이 습기 등 여러 요인에 의해서 급격하게 증가하면서 효율이 감소하게 되는 것을 관찰할 수 있으며 모듈 제작 시 사용된 셀 중에 어느 특정한 셀의 성능이 감소하게 되면 그 셀 하나로 인하여 모듈 전체의 성능이 감소하는 현상이 발생하기도 한다. 아

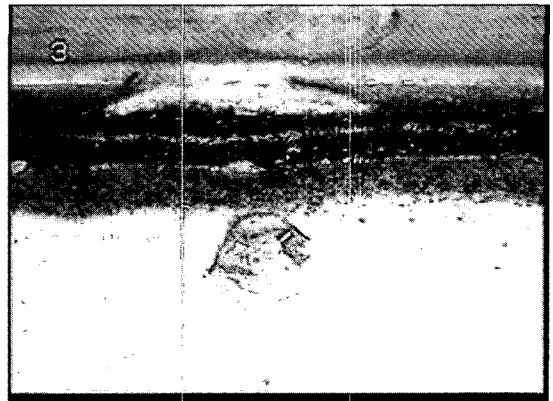
래에서는 모듈의 노화에 대하여 설명하고 있다

그림6은 태양전지 모듈의 노화 현상을 보여주고 있는 그림으로 (a)는 모듈내부에 습기가 침투하여 전극이 산화되어 있는 모습이고, (b)는 모듈의 Back Sheet에 흠집이 발생한 경우이며, (c)는 Back Sheet Crack이 발생한 경우이고, (d)는 EVA Sheet의 자외선에 의한 변색 현상으로 모듈의 백화 현상이 일어난 모습을 보여 주고 있다.

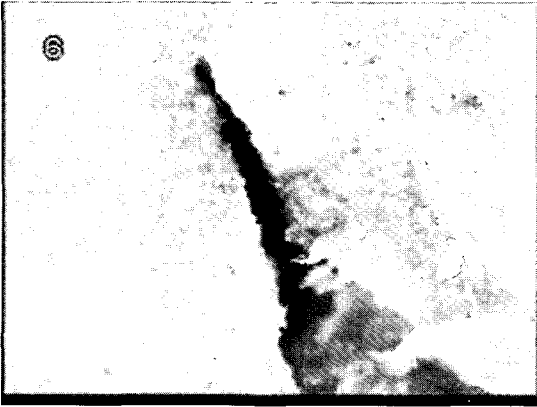
그림7은 모듈의 직렬 저항이 증가하면서 Fill Factor(FF)가 저하하여 전체 효율이 감소하는 여러 원인과 과정에 대하여 나타내고 있는 그림으로 직렬 저항이 증가하게 되는 공정상의 원인과 태양전지의 불량으로 인한 원인, 그리고 모듈 제작 시 일어날 수



(a) 전극산화



(b) Backsheet scar



(c) Backsheet crack

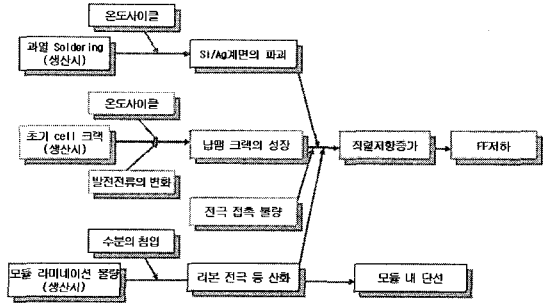
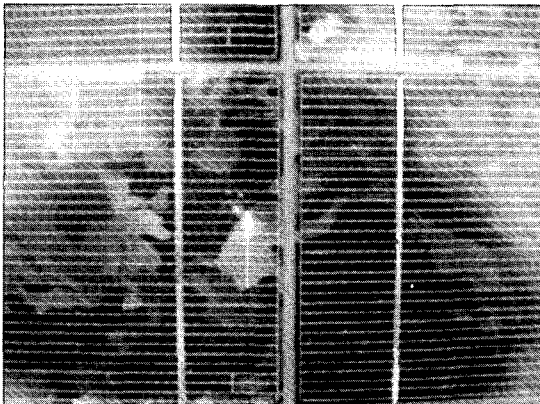


그림 7. 직렬 저항의 증가의 여러 원인과 과정.



(d) 백화현상

그림 6. 모듈의 여러 가지 노화현상.

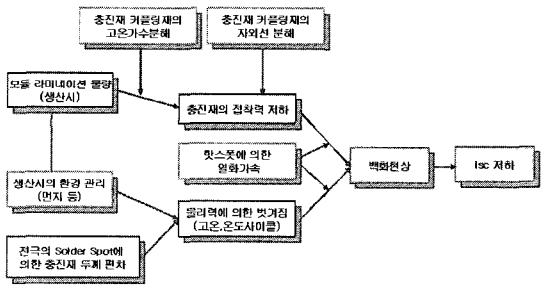


그림 8. EVA sheet 변색의 여러 원인과 과정.

있는 여러 원인과 그 결과에 대하여 설명하고 있다. 모듈의 직렬 저항이 증가하게 되면 모듈이 만들어내는 전력대비 우리가 사용할 수 있는 전력이 감소하게 되고 이러한 개념이 곧 FF의 감소를 의미하게 된다. 따라서 모듈의 직렬 저항이 증가하지 않도록 안정적인 부품과 공정과정을 거쳐야 할 것이다.

그림8은 모듈 제작 시 사용되는 EVA Sheet가 공정의 부적절함과 사용 중 여러 요인으로 그 색이 변하는 일련의 과정과 원인들을 보여주는 그림으로 이러한 요인에 의하여 EVA Sheet의 변색이 일어나게 되면 태양전지에 도달하는 태양에너지가 감소하게 되며 결국 최대 전류가 작아지고 이에 모듈 전체의

효율이 감소하는 결과에 이르게 된다. 따라서 최적의 공정과정을 찾는 것이 무엇보다 중요하며 자외선에 영향을 적게 받아 변색이 잘 안 되는 재료를 찾아 이를 이용하는 것이 최선의 방법일 것이다. 현재 외국에서는 이러한 재료를 만드는 것이 연구 중이며 일부 실제의 제품에 응용하는 단계에 까지 이르고 있는 실정이다.

그림9와 그림10은 실제 섬 지역에서 15년간 사용된 후 수거된 모듈을 성능시험 한 그래프로 직렬 저항 증가와 EVA sheet 변색에 따른 효율의 감소를 보여주고 있다. 그림9는 전극의 산화와 셀의 열화가 일어난 시료의 전류 전압 곡선을 보여주고 있는데, 모두다 FF가 감소하는 경향을 보이고 있으며 특히 셀

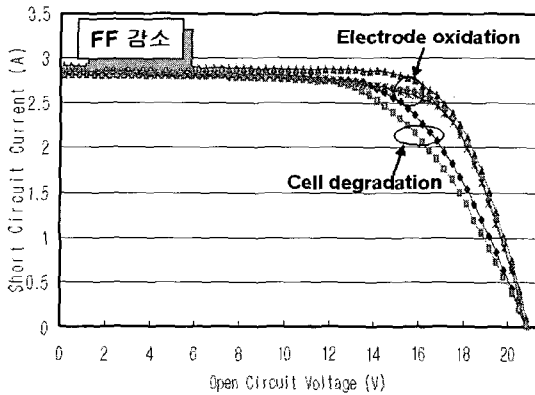


그림 9. 직렬저항 증가에 따른 전류 전압 곡선.

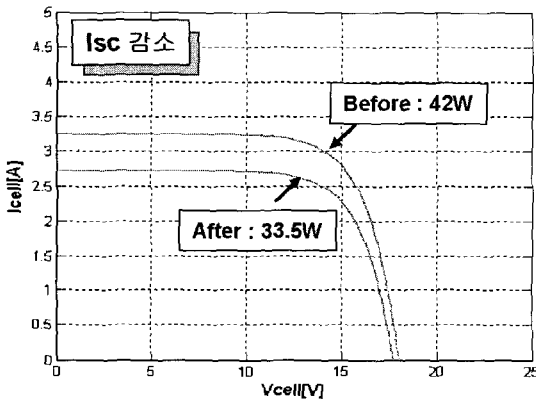


그림 10. EVA sheet 변색에 따른 전류 전압 곡선의 변화.

의 열화가 FF를 더욱더 감소시키는 결과를 볼 수 있다. 그림10은 EVA Sheet가 변색된 시료의 변색 전후의 전류-전압 곡선을 보여주는 것으로 EVA Sheet 변색에 의해서 약 20%의 효율이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이처럼 모듈의 노화는 전체 효율을 현저하게 떨어뜨리는 결과를 가져오고 있으며 이러한 현상을 방지하기 위하여 모듈에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것이다.

### 3. 기타 손실 요인

#### 3.1 PCS 및 회로 구성

태양전지 모듈로부터 발생하는 전압은 직류로써

우리가 일상생활에서 사용하기 위해서는 적당한 교류 전압으로 변환해야한다. 이러한 직류를 교류로 변환하는 장치를 일반적으로 인버터라고 하는데 최근 들어 이러한 태양광발전 시스템은 독립적으로 사용되는 경우보다 계통과 연계되어 사용되는 경우가 더 일반적으로 되면서 인버터의 기능에 계통과의 안전하고 안정적으로 연결시키기 위한 기능이 추가되고 이를 PCS(Power Conditioning System)로 부르고 있다. 이러한 PCS는 그 기본 기능이 직류를 교류로 변환하는데 있는데 이러한 변환 과정 중에 필연적으로 효율의 감소가 일어나게 되며 이러한 효율의 감소를 줄이기 위하여 여러 연구가 진행 중이다. 또한 계통과 연결 되면서 그에 따른 여러 기술이 개발되고 있다. 그리고 기타 물리적인 손실 요인으로서론에서 언급한 바와 같이 태양광 발전시스템을 형성하는 전체 회로의 부적절한 설계 및 상호 부조화에서 발생하는 효율 감소가 있겠다.

#### 3.2 환경적 요인

각 시스템에 사용되는 물리적 요소에 의한 손실 뿐만 아니라 태양광 발전시스템이 구동 되는 여러 환경에 의한 요인으로 효율이 감소하는 경우가 발생하는데, 태양광 발전시스템의 모듈 어레이가 설치되는 방위각, 경사각 등이 부적절하여 발생할 수 있는 설치상의 오류로 인한 효율감소와 발전이 진행되는 과정에서 모듈의 일부에 그림자가 발생하거나 부분적인 파손으로 인한 효율 감소 등 그 환경적인 효율 변화의 요인도 간과해서는 안 될 것이다.

## 4. 결론

태양광 발전 시스템 중 직접적으로 태양에너지를 전기에너지로 변환하는 태양전지 모듈은 태양광 발전 시스템에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 요소로서 전체 시스템의 효율을 개선하고 유지하는데 가장 중요한 요소에 속한다. 모듈을 제작할 때 일차적으로 고효율이고 안정성이 있는 태양전지 셀을 사용하는 것이 우선시 되어야 할 것이며, 이후 안정적인 재료의 확보와 최적 공정기술의 확립이 최고의 효율을 보장할 수 있는 지름길일 것이다. 이외에 시스템 전반에 걸쳐서 여러 손실요인이 존재하게 되는데

PCS와 회로구성 그리고 환경적인 요인들을 최적의 상태로 구현하고 유지한다면 무한 청정에너지인 태양에너지를 이용한 태양광 발전 시스템이 궁극적으로 최고의 대체 에너지가 될 것이다.

### 참고 문헌

- [1] M.A.Quintana, D.L.King, F.M.Hosjing, J.A.Kratochvil, R.W.Johnson, B.R.Hansen, N.G.Dhere and M.B.Pandit, "Diagnostic Analysis of Silicon Photovoltaic Module after 20-Year Field Exposure", 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, P. 1420, 2000.
- [2] G. H. Kang, G. J. Yu, K. U. Park, H. K. Ahn and D. Y. Han, "A basic study on the element technology for PV module manufacture", Proc. 2003 Summer Conf. KIEE, p. 1365, 2003.
- [3] G.H.Kang, G.J.Yu, H.K.Ahn and D.Y.Han, "Consideration of Electrical Properties in Field-aged Photovoltaic Module", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 17, No.12, p.1289, 2004.
- [4] Antonio Parretta, Mariano Bombace, Giorgio Graditi and Riccardo Schioppo, "Optical degradation of Long Term, field aged c-Si photovoltaic modules", Solar Energy Materials & Solar cells, Vol.,86, p.349, 2005.

### 저자약력



성명 : 박지홍

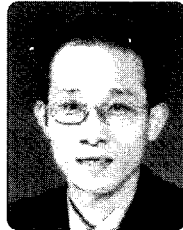
◆ 학력

- 1997년 건국대 전기공학과 공학사
- 2000년 건국대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2006년 건국대 대학원 전기공학과 박사과정

◆ 경력

- 2002년 - 현재

동양공업전문대학 전기전자통신공학부 겸임교수



성명 : 강기환

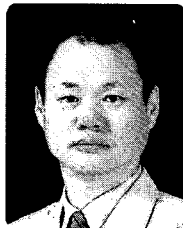
◆ 학력

- 1991년 대전공업대학 전기공학과 공학사
- 1993년 건국대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2005년 건국대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1987년 - 현재

한국에너지기술연구원 태양광시스템연구센터 선임연구원



성명 : 안형근

◆ 학력

- 1983년 연세대 전기공학과 공학사
- 1985년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1995년 Univ. of Pittsburgh, Ph.D

◆ 경력

- 1996년 - 현재

건국대 전기공학과 교수