

40keV 저에너지 전자빔을 이용한 단결정 Si 태양전지의 변환 효율에 관한 연구

윤정필, 강병복, 박세준, 윤필현, 차인수
 동신대학교 전기광전자공학부

Study about Conversion Efficiency of c-Si Solar Cells Using Low energy(40keV) Electron Beam.

J.P. Yoon, B.B. Kang, S.J. Park, P.H. Yoon, and I.S. Cha
 Dept. of Electrical & Optic Electronics Eng. Dongshin University

ABSTRACT

This paper about the small electron beam irradiator for solar cell's efficiency. Many things are studied by method to increase conversion efficiency of solar cell. We selected electron beam by method for conversion efficiency of solar cell. Energy bands of this electron beam irradiator is 80keV (max.). And, solar cells that apply in this paper are crystal Si. Average efficiency of solar cell that applies in this experiment is 10%. This system manufactured low energy electron beam irradiator. And, electron beam irradiation to solar cell in vacuum chamber of this irradiator. Irradiation area is 20*20 [mm²] by 40[keV].

1. 서 론

화석에너지를 대체하는 청정에너지로 태양광, 풍력, 바이오메스 등 여러 가지 대체에너지들이 보급되고 있다. 그 중에서도 태양광 발전의 보급률은 뛰어난 편이다. 태양광 발전은 깨끗하고 독립형 발전에서 뛰어난 효과를 보임에도 불구하고 전력변환효율이 타 에너지에 비해 떨어지고 날씨의 변화에 민감하는 등 몇 가지 단점을 지니고 있어 전면적인 보급에는 미흡하다는 지적을 받고 있다. 이러한 태양광 발전의 단점을 보완하기 위한 연구로 기존 실리콘을 대체하는 재료에 대한 연구와 태양광 발전 시스템의 최적화를 통한 변환효율 향상의 연구, 컨버터, 인버터 재설계를 통한 연구 등 다양한 연구들이 진행되고 있다. 본 논문에서 제시한 전자빔을 이용한 연구의 경우 고 에너지대의 위의 효율 향상에 관한 연구 이외의 분야인 방사능에 대한 태양전지의 파괴, 효율 저하, 표면 변화 등의 연구에 주로 사용되어져 왔다.^[1-12]

본 논문에서는 기존의 고 에너지를 이용한 전자빔 연구가 아닌 100KeV 이하의 저 에너지 전자빔을 이용하여 태양전지의 효율 변화를 측정하고 이를 분석하고자 하였다. 이를 위해 최대 80keV의 출력을 갖는 전자빔 조사 장치를 제작하였고, 전자빔 조사 면적에 맞는 단결정 Si 태양전지를 제작하여 실험에 사용하였다. 실험은 40keV 출력에 맞추고, 조사시간을 변화시켜 전자빔 조사 전후의 결과 값에 대해 비교 분석하고자 한다.

2. 전자빔 조사장치의 제작

본 논문의 실험에 사용된 전자빔 조사장치는 그림 1과 같은 구조를 가지고 있다.

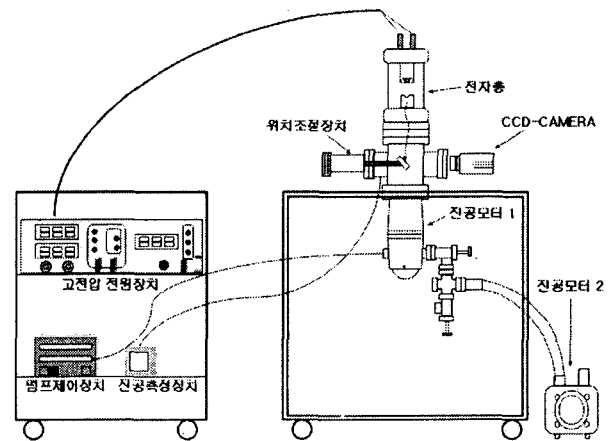


그림 1 실험장치의 구성도
 Fig. 1 Schematic diagram of experiment device.

그림 1에서 보이는 바와 같이 전자빔 조사장치는 고전압전원장치, 전자총, 진공챔버, 진공모터, 진공모터 제어장치, 진공측정장치, CCD camera, 시료 위치 조절장치 등으로 구성되어 있다.

2.1 전자빔 조사장치의 설계변수

표 1은 본 시스템의 주요 설계변수를 나타낸다. 전자빔 조사장치는 약 4.5×10^{-6} [Torr]의 진공도를 갖는 진공 chamber 내에서 전자총을 통하여 최대 80[keV]까지의 에너지를 갖는 저에너지의 전자빔을 진공 중에 20[mm] × 20[mm]의 단면적에 직접 인출할 수 있게 제작하였다.

표 1. 설계된 시스템의 주요 설계 변수
Main design parameters of the fabricated system.

음극 재질	LaB6	전자총
음극 직경	3[mm]	
동작 전압	0 ~ 80[keV]	
방출 전류	0 ~ 3[mA]	
동작 방식	CW	
조사 단면적	20[mm] × 20[mm]	조사장치
냉각방식	공냉식	

2.2 전자총

본 실험에서 제작된 전자총은 Pierce gun을 변형한 Anode와 cathode로 구성된 이극관형으로 제작되었다. 이 구조에서는 전자총의 양극간에 펄스 또는 직류 전압을 인가함으로써 전자빔을 연속적으로 인출할 수 있다.

전자빔의 인출은 열전자 방출방식으로 cathode 주위에 필라멘트를 두고 필라멘트를 가열하여 발생된 열전자를 필라멘트와 cathode 사이에 전압을 인가하여 cathode를 때리게 함으로써 cathode를 가열시키는 방식이다. cathode의 재질은 열전자빔 방출원으로 널리 쓰이는 LaB6를 사용하였다.

본 실험에서는 LaB6가 필라멘트의 중앙에 위치하도록 하였고, 필라멘트는 직경 0.6[mm]의 텅스텐을 사용하였고, 외부에서 전압을 인가하여 진공챔버에 연결되어 있는 cathode와 필라멘트를 가열하기 위한 역할을 하는 피드스루에 필라멘트 지지와 LaB6가 중심에 위치할 수 있도록 조절하기 위한 연결부가 끼워져 있다. 또한, 열손실을 줄이고 cathode의 가열 효과를 높이기 위하여 필라멘트 주위를 0.01[mm] 두께의 탄탈륨 판으로 열 차폐 효과를 갖도록 하였다.

2.3 시스템 구성

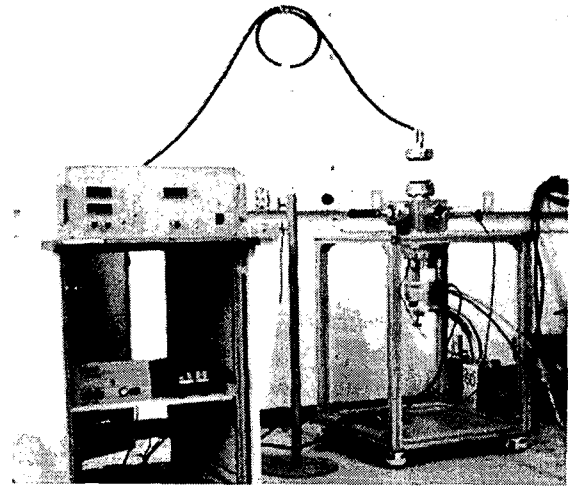


그림 2 제작된 전자빔 조사장치
Fig. 2 Manufactured electron beam irradiator.

그림 2 왼편의 장치는 고전압 전원장치 및 측정장치, 오른편에는 전자총과 진공 챔버 및 조절장치가 위치하고 있다. 고전압 전원장치는 VS&I사의 HP100kV-9mA 모델을 사용하였으며, 장치의 구성은 그림 22과 같이 전자빔 전압/전류 제어부와 필라멘트 전류 제어부로 구성되어 있다. 최대 전압은 100[kV], 필라멘트 전류 12[A]까지 가능하며, 본 실험에서는 전압 40[kV], 전류 9[A]로 고정하여 사용하였다. 진공펌프의 경우 VARIAN 사의 Turbo-V200 모델을 사용하였으며, 그림 20의 본체에 붙어 있는 모터 본체와 그림 22의 아래쪽 왼편의 모터 컨트롤러의 두개부분으로 구성되어 있다. 진공도는 3.5×10^{-6} [Torr]까지 가능한 것을 확인하였다. 진공도를 측정하는 진공측정장치는 그림 22 아래쪽 오른편과 같은 All▲TEL의 μ pascal 모델을 사용하였다.

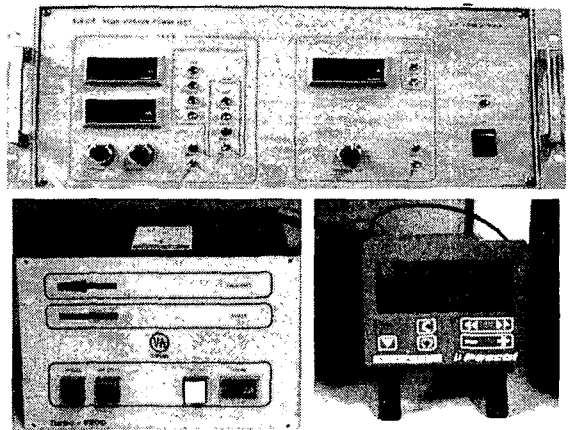


그림 3 고전압 전원장치와 진공펌프 컨트롤러 및 진공 측정 장치
Fig. 3 High voltage supply & Vacuum pump controller & measurement device of vacuum.

3. 단결정 Si 태양전지

3.1 단결정 Si 태양전지 시료

본 논문에 사용된 태양전지는 국내 태양전지 전문 제조기업인 (주) 네스코 솔라에서 제작된 태양전지를 (주)해성 솔라에 의뢰하여 가공된 것으로서, 그림 4와 같은 구조로 되어있다. 그리고, 시료의 단면 구조는 표 2과 같다.

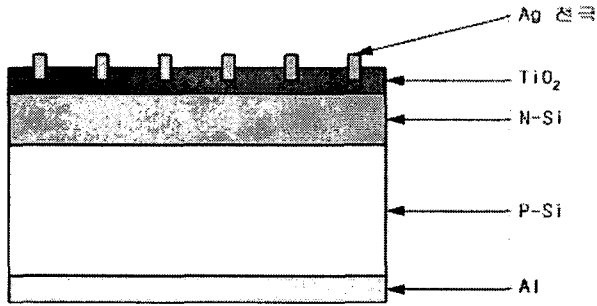


그림 4 본 논문에서 사용된 태양전지의 구조
Fig. 22 Structure of solar cell that is used in this paper.

표 2 시료의 단면구조
Table 8 Section structure of materials for experiments.

구분	구조	비고
전극	Ag	(-)극 line
반사 방지막	TiO ₂ 700 [nm]	불순물제거 및 내부반사 방지막
n-Si	0.3~0.5 [μ m]	5가 원소 소량첨가
p-Si	300 [μ m]	
Al	Al	3가 원소

본 실험을 위해 제작된 전자빔 조사장치에서 인출되는 전자빔의 직경이 2.0[cm]×2.0[cm]인 관계로, 면적이 큰 태양전지 보다 진공 중에서 전자빔을 정확하게 조사할 수 있는 크기인 0.8[cm] × 1[cm]로 태양전지를 제작 하였다. 그림 5는 본 논문에서 사용한 단결정 Si 태양전지 시료이다.

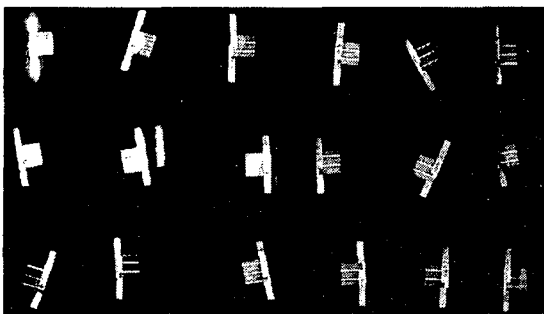


그림 5 단결정 Si 태양전지 시료
Fig. 26 c-Si Solar Cell sample.

3.2 태양전지 시료 분석

전자빔 조사전후의 변화 분석을 위하여 먼저 실험대상으로 제작된 태양전지를 X-선 회절분석기를 이용하여 결정상을 분석하였다.

분석된 데이터는 ASC II 코드로 변환하여 Origin S/W를 이용하여 그림 6과 같이 나타내었다.

- 조건 : 30[kV] , 40[mA]
- 제조회사 : Rigaku XRD series
- 조사각도 및 속도 : 2θ , 1[°/sec]
- 분석조건 : Cu α 1

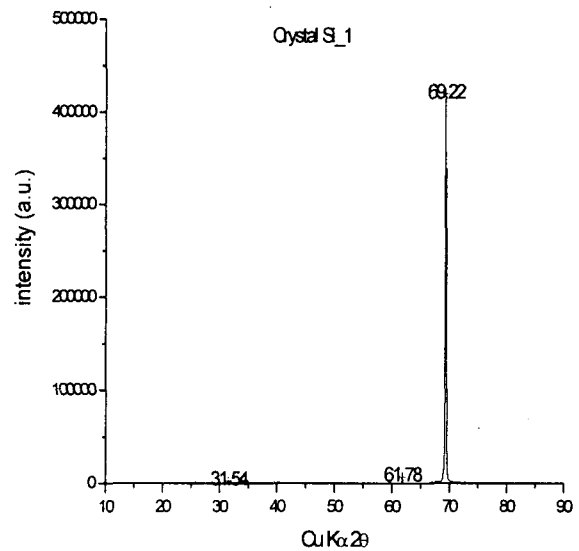


그림 6 단결정 Si의 XRD 패턴 (1)
Fig. 6 XRD pattern of the Crystal Si (1).

본 실험에서 사용된 단결정 Si 태양전지를 X-선 powder diffraction file과 비교 하였을 때 그림 6에서 볼 수 있듯이 69° ~ 70° 근방의 2θ에서 나타나는 peak는 Si(JCPDS card No. 03-0549)의 주 peak와도 일치하였는데, 이는 Si의 결정질이 고순도로 접합되어 있다는 것을 알 수 있었다.

또한, 30° ~ 35° 근방의 2θ에서 나타나는 곡선은 TiO₂ 와 기타 소량의 불순물들이 섞여서 비정질로 이루어진 곡선을 이루고 있음을 보여주고 있다.

4. 전자빔 조사 실험 및 결과

제작된 전자빔 조사 장치와 단결정 Si 태양전지를 이용하여 그림 7과 같은 순서도를 가지고 실험을 진행하였다.

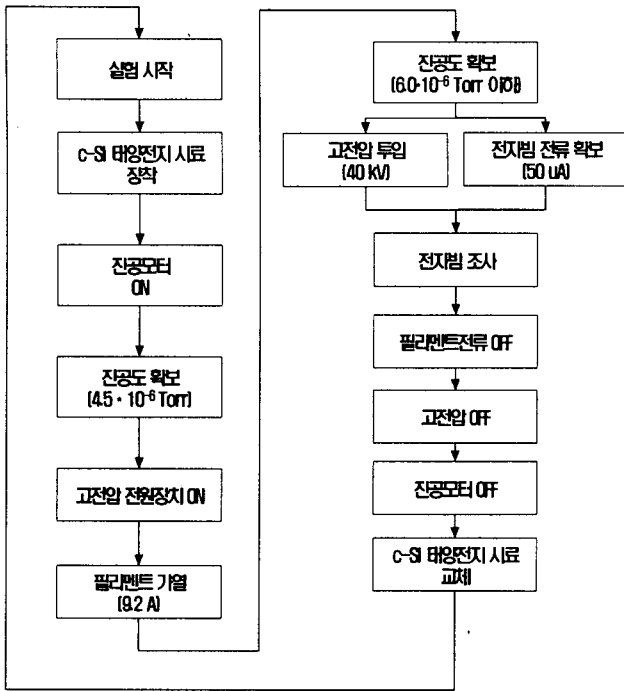


그림 7 전자빔 조사 실험 순서도
Fig. 7 Flow-chart of experiment for Electron Beam irradiation.

실험 시작 후 전자빔 조사를 위한 진공도 확보를 위하여 진공모터를 시동 25분후 진공도 측정 장치를 통하여 4.5×10^{-5} [Torr]의 진공도를 확인한다. 진공도가 확보되면 고전압 전원장치의 메인 전원을 켜고, 필라멘트를 9.5[A]까지 가열한다. 필라멘트가 가열될 때 전류값 5[A]에서 진공도가 상승하는 현상을 보였고, 진공도가 다시 복귀하는데 2분 정도 소요되었다. 진공이 확보된 이후 다시 필라멘트 전류를 9.5[A]까지 상승시켰으며, 이때 진공도는 7.6×10^{-6} [Torr]까지 상승 하였다. 그림 8은 전자빔이 조사되고 있을때 고전압전원장치의 전면부 상태이다. 필라멘트 표면에 분포되어있는 산화막의 완전한 제거를 위하여 9.5[A] 상태에서 약 15분간을 지속적으로 가열하였다. 필라멘트가 완전히 가열된 후 고전압 전원장치의 전자빔 전압을 40[kV]까지 2분여에 걸쳐 서서히 가압하였다. (그림 8 참조) 전자빔 전압이 40[kV]에 이르면 전자빔 전류는 $45 [\mu A] \sim 50 [\mu A]$ 가 인출된다. 전자빔 전류 $50 [\mu A]$ 를 유지하면서 조사하였다. 그림 9는 전자빔이 조사될 때 챔버 내부가 가열되어 있는 모습을 측정하는 것이다. 조사가 끝난 후 태양전지 시료의 급격한 산화와 필라멘트의 끊어짐을 방지하기 위하여, 열이 완전히 식을 때까지 약 30여분간의 시간적 여유를 두었다. 그 후에 진공모터를 OFF 하였는데, 진공모터의 완전한 멈춤까지의 시간을 20분으로 측정하고, 20분후 태양전지 시료를 교체하였다.

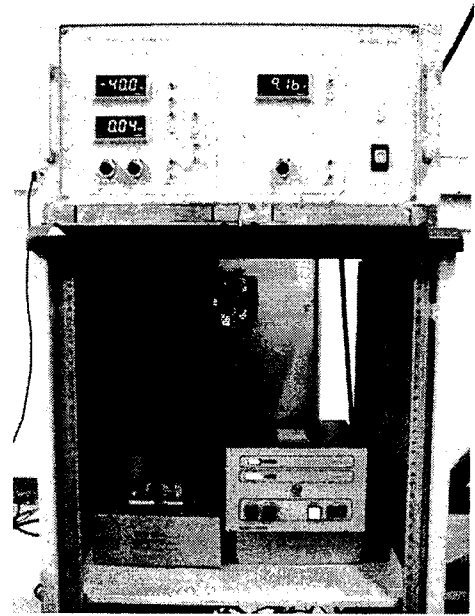


그림 8 전자빔이 조사되고 있는 상태에서 전원장치의 상태
Fig. 8 The state of a power supply device when the Electron Beam irradiation

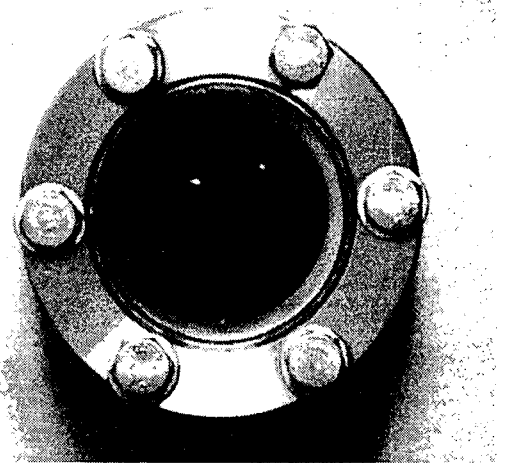


그림 9 전자빔을 조사할 때의 챔버 내부의 상태
Fig. 9 An inside situation of the chamber when the irradiation does an electron beam

이러한 방식으로 시료를 지속적으로 조사 하였으며, 조사 구분은 c-Si 태양전지 시료를 각각 3분, 6분, 9분, 12분, 15분, 20분, 30분, 40분으로 조사시간을 서서히 늘리면서 시료의 변화를 관찰하였다. 다음에 나타내어진 그림 10, 11, 12은 각각 3분~15분까지 5단계로 측정하기 위한 시료 10개, 20, 30, 40분 측정을 위한 3개 시료 등 합계 13개의 시료에 대한 전자빔 조사전의 $J_{sc} - V_{oc}$ 특성곡선이다.

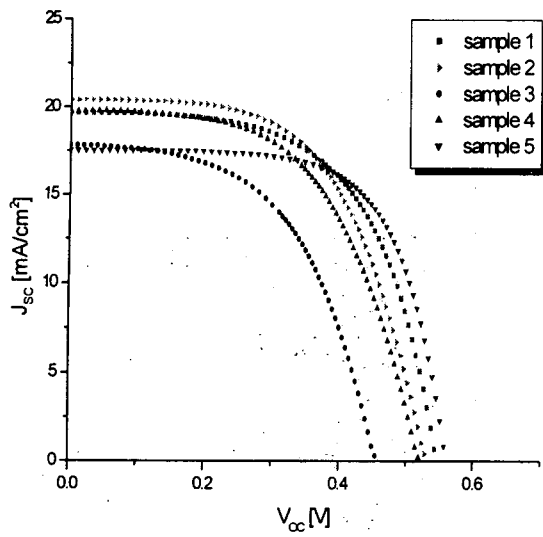


그림 10 조사전의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성 곡선 (1)
 Fig. 10 $J_{SC} - V_{OC}$ curve before irradiation (1).

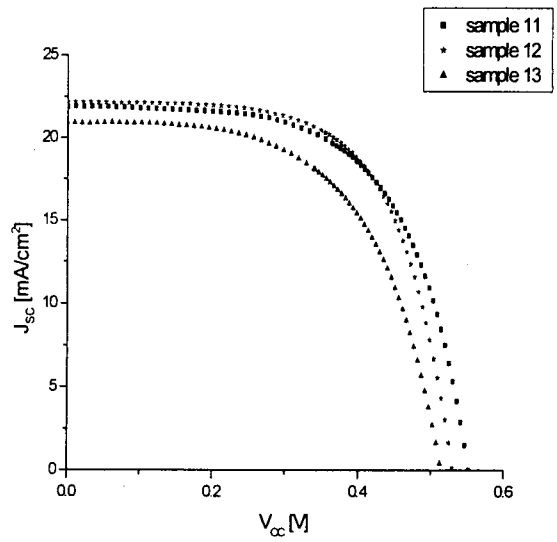


그림 12 조사전의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선 (3)
 Fig. 12 $J_{SC} - V_{OC}$ curve before irradiation (3).

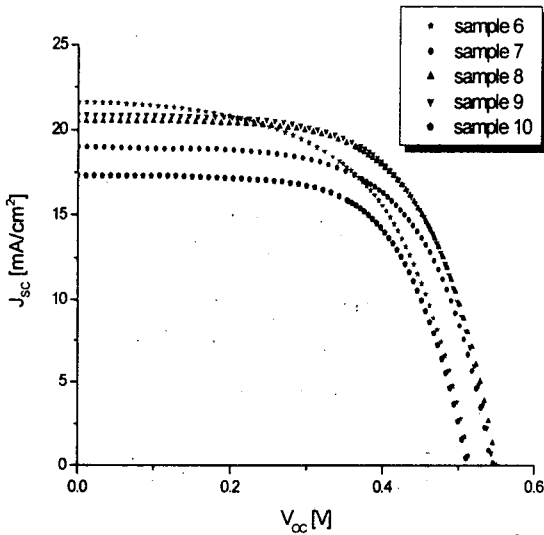


그림 11 조사전의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선 (2)
 Fig. 11 $J_{SC} - V_{OC}$ curve before irradiation (2).

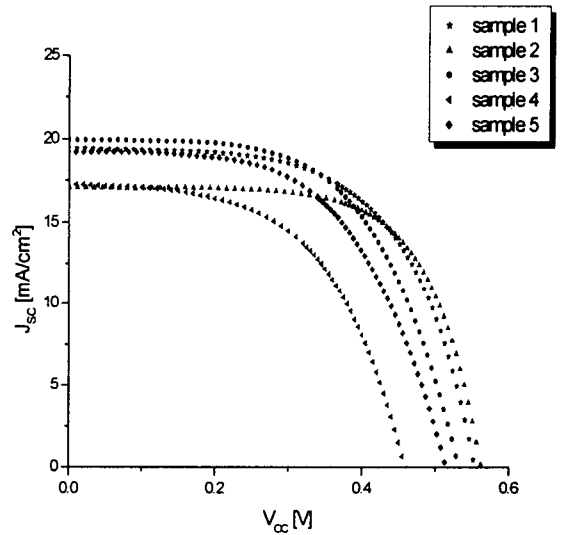


그림 13 조사후의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선 (1)
 Fig. 13 $J_{SC} - V_{OC}$ curve after irradiation (1).

그리고, 그림 12, 13, 14은 전자빔 조사후의 그래프이다.

각각 시료별로 1,2,3,4,5 와 6,7,8,9,10 은 3분, 6분, 9분, 12분, 15분동안 전자빔을 조사했을 때의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선을 2회에 걸쳐 측정된 결과이며, 11,12,13의 그래프는 각각 20분, 30분, 40분 동

안 전자빔을 지속적으로 조사했을 때의 특성 곡선이다.

표 3은 그림 10 ~ 그림 15까지의 전자빔 조사 전·후의 변환효율 측정값을 표로 나타내어 비교한 것이다.

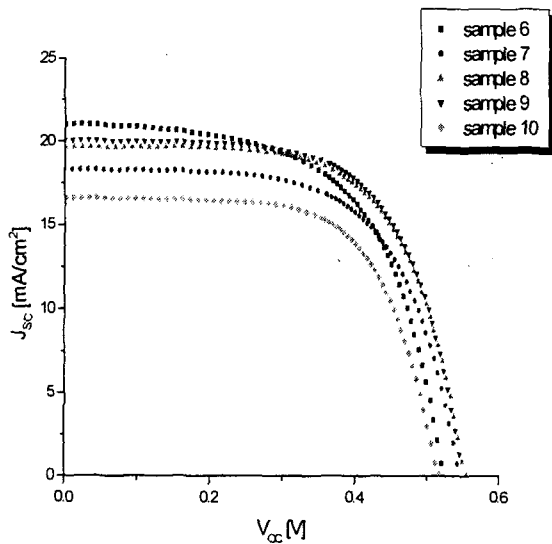


그림 14 조사후의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선 (2)
 Fig. 14 $J_{SC} - V_{OC}$ curve after irradiation (2).

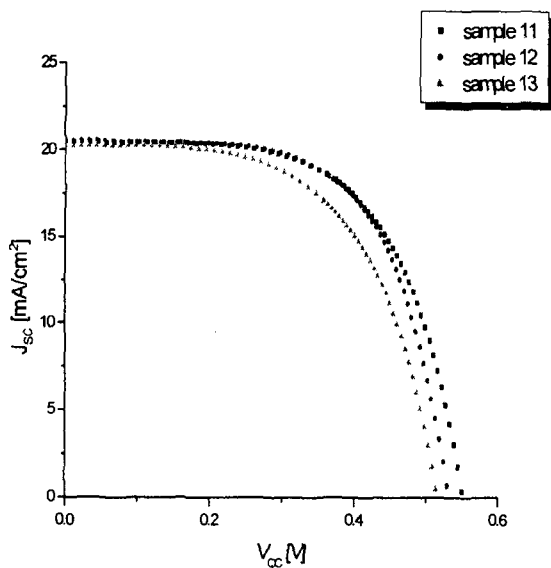


그림 15 조사후의 $J_{SC} - V_{OC}$ 특성곡선 (3)
 Fig. 15 $J_{SC} - V_{OC}$ curve after irradiation (3).

표 10의 결과를 보면, 초기 3분간의 전자빔 조사에서 0.26% 효율의 증가를 가져왔고, 나머지 6,9,12,15,20분의 전자빔 조사에서는 평균 0.28%의 감소를 가져왔다. 나머지 30분과 40분간의 전자빔 조사에서는 각각 0.84[%], 0.74[%]의 감소를 나타내었다.

표 3 전자빔 조사 전·후의 변환효율 비교

Table 3 comparison of conversion efficiency by Electron beam irradiation (before/after)

전자빔 조사 전·후의 변환효율 [%]				
	조사전(1)	조사전(2)	조사후(1)	조사후(2)
3분	10.121915	10.046025	10.293	10.3883
6분	10.359149	10.358451	10.08696	9.84906
9분	9.8889	11.378995	9.88078	10.97512
12분	6.890044	11.467541	6.94668	10.94340
15분	9.091939	9.066274	8.91332	8.86574
20분	9.956147		9.72218	
30분	11.89389		11.05442	
40분	11.762331		11.0227	

5. 결론

본 논문에서는 입자빔을 이용한 기존의 연구들이 위성용 태양전지에 적용될 내방사선 효과 또는 수명에 관련된 연구를 진행하였던 것에 반하여 기존의 실험 대역과는 다른 저 에너지대의 전자빔을 이용하였다. 또한, 소형 전자빔 조사장치를 직접 제작하고 이를 이용하여 진공챔버 내에서 c-Si 태양전지에 직접 전자빔을 조사하여, 태양전지에 미치는 영향과 변환효율의 변화를 측정하여 결과를 분석하였다.

실험결과를 통하여 전자빔의 조사시간이 길어질수록 위의 표와 같이 태양전지의 효율이 떨어지는 것을 알 수 있었다.

하지만, 본 실험 결과만으로 전자빔 노출 시간이 길어질수록 효율이 줄었다고는 할 수 없다.

그 이유는 전자빔 조사 실험에서 나타난 몇 가지 효율 오차를 들 수가 있는데, 효율에 영향을 줄 수 있는 오차는 다음과 같다.

- 1) 태양전지의 효율을 측정하는 태양전지 시뮬레이터 전극의 접촉저항.
- 2) 태양전지 효율을 측정하는 환경에서 실내 온도를 25°C로 유지해야 하는데 완전한 항온 항습실이 갖춰지지 않은 측정환경에서 야기되는 오차
- 3) 전자빔 조사 후 시료 교체 및 보관에서 야기될 수 있는 오차
- 4) c-Si 태양전지 표면의 반사방지막인 TiO₂ 가 벗겨지면서 생기는 오차

이러한 손실들로 인하여 측정 결과에서 ±0.2%의 오차를 감안 하였을 때, 본 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 40[kV], 50[μ A]의 저에너지 전자빔을 진공 챔버 내에서 3분간 c-Si 태양전지에 직접 조사 하였을 때 광전변환효율은 0.2[%] 상승하였다.
- 2) 3분에서 15분사이의 전자빔 조사에서 태양전지의 광전변환효율은 크게 변화되지 않았다.
- 3) 전자빔을 동일 조건에서 20분 이상 조사했을 때부터 광전변환효율이 0.7[%] 이상 감소하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 본 실험을 통하여 전자빔 조사 시 야기되는 오차들과 정확한 조사방법에 대하여 습득하게 되었으며 이를 통해 차후 전자빔 조사 실험에서의 오차율을 줄이는 기초가 될 것으로 여겨 짐.

차후 소형 전자빔 조사장치를 이용한 태양전지의 효율 및 내방사선에 관한 연구는 본 논문을 바탕으로 다음과 같이

- 1) 발견된 오차의 최소화 수정작업
- 2) 태양전지 시료 크기 및 재료의 다양화
- 3) 기존 진공 챔버 보다 다양한 측정 장치의 설치가 가능한 챔버의 제작
- 4) 전자빔 전압값의 상승 (본 실험 40 [keV] → 70, 80 [keV])

및 본 실험의 데이터에서 측정된 3분 이하의 측정 시간에 대한 추가적인 실험이 진행될 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] D. Flood, H. Brandhorst, in: T.J. Coutts, J. Meakin (Eds.), Current Topics in Photovoltaics, Vol. 2, Academic Press, New York, 1987, P. 143.
- [2] H.Y. Tada, J.R. Carter Jr., B.E. Anspaugh, R.G. Dowing, Solar Cell Radiation Handbook, 3rd Edition, JPL Publication 69-82, Pasadena, California, 1982.
- [3] B.E. Anspaugh, Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, New York, 1992, P. 1953.
- [4] M. Yamauchi, S.J. Taylor, S. Matsuda, and O. Kawasaki, Appl. Phys. Lett. 68(1996)3141.
- [5] P.M. Mooney, L.J. Cheng, N. Suli, J.D. Gerson, J.W. Corbett, Phys. Rev. B15 (1977) 3836.
- [6] G. P. Summers, E.A. Burke, R. Shapiro, S.R. Messenger, R.J. Walters, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-40(1993) 1300.
- [7] M. Yamaguchi, A. Khan, S.J. Taylor, K. Ando, T. Yamaguchi, S. Matsuda, T. Aburaya, J. Appl. Phys. 86 (1999) 217.
- [8] G.D. Watkins, Radiation Damage and Defects in Semiconductors, Dunod, Paris, 1965, p. 97.
- [9] J.W. Corbett, in: F. Seitz, D. Turnbull (Eds.), Solid State Physics, Suppl. 7, Academic Press, New York, 1966.
- [10] J.C. Bourgoin, J.W. Corbett, Phys. Rev. 38A (1972) 135.
- [11] L.C. Kimerling, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23 (1976) 1497.
- [12] Mitsuru Imaizumi et al., J. Appl. Phys. 85, Num. 3 Feb(1999) 1919.