

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(7), 622-627(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.7.622>

상용 배열형 렌즈를 적용한 집광형 태양전력시스템의 우주 적용 가능성 실험적 검토

박태용*, 채봉건*, 이용근**, 강석주**, 오현웅***

Experimental Investigation of Concentrating Photovoltaic System Applying Commercial Multi-array Lens for Space Applications

Tae-Yong Park*, Bong-Geon Chae*, Yong-Geun Lee**, Suk-Joo Kang** and Hyun-Ung Oh***

Space Technology Synthesis Laboratory, Department of Aerospace Engineering, Chosun University* ,***
Optronics System Group, Samsung Thales**

ABSTRACT

A pico-class satellite has limitation to generate power from the solar cells due to its limited accommodation area to install the solar cells. The variation of incidence angle between solar panels and sunlight induced by the revolution and rotation of the satellite is one of the key parameters to determine the power generation. In this study, we proposed a concentrating photovoltaic system for pico-class satellite applications to enhance power generation when the β angle between the sunlight and the solar panel is zero by effectively concentrating solar energy on solar panels. The feasibility of the conceptual idea has been demonstrated by power measurement test using solar simulator and commercial multi-array lens system.

초 록

극초소형 위성으로 분류되는 큐브위성의 경우, 표준화된 위성의 크기로 인하여 위성의 전력생성을 목적으로 하는 태양전지판 장착을 위한 공간이 극히 제한적이며, 자세제어 적용 방식에 따라서는 태양전지판에 입사되는 태양광의 각도가 변화하고 이는 태양전지의 전력생성 양을 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 본 논문에서는 극초소형 위성 적용을 목적으로 태양광과 태양전지판이 이루는 각도가 0°인 조건에서도 태양전지판 외곽에 배치된 렌즈어레이를 통해 태양광을 효율적으로 조사하여 전력생성 효율 향상이 가능한 우주용 집광형 태양전력 시스템을 제안하였으며, 극초소형 위성으로의 적용 가능성 검토를 위해 상용 렌즈어레이를 적용한 기능시험을 통해 유효성을 입증하였다.

Key Words : Concentrating Photovoltaic System(집광형 태양전력 시스템), Solar Power (태양 전력), Cube Satellite(큐브 위성)

1. 서 론

일반적으로 위성은 우주의 무한한 에너지인 태양 에너지로부터 태양전지판을 이용하여 위성 시스템 운용에 필요한 전력을 생성한다. 극초소형 위성으로

분류되는 큐브위성의 경우도 비록 크기의 제한에 따른 성능의 한계는 존재하지만 최근 임무의 다양화 및 첨단화 추세에 따라 전력생성 요구조건이 증가하고 있다. 이를 충족하기 위해 더욱 넓은 면적의 태양전지판의 적용이 요구되는 등 발사

† Received: May 1, 2014 Accepted: June 12, 2014

*** Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

시 수납되어 궤도상에서 전개되어 운용되는 전개형 태양전지판이 포함되는 큐브위성이 [1-2]이 증가하고 있는 추세에 있다. 기본크기인 1U를 기준으로 10cm×10cm×10cm 크기의 큐브위성의 경우, 태양전지판 설치를 위한 공간의 제약조건 및 육면체 형상으로 인해 자세제어 방식에 따라서는 태양광을 받을 수 있는 면의 개수의 제한이 수반된다. 또한, 통신용 안테나 장착을 위한 전용 판넬을 필요로 하는 등 탑재체 수의 증가에 따라 태양전지판 설치 가능면적은 더욱 적어지게 된다. 발사시 수납되고 궤도상에서 전개되어 운용되는 전개형 태양전지판을 적용할 경우, 상기의 문제점 해결은 일정부분 가능하나 태양전지판 구속 및 분리를 위한 메커니즘이 추가로 요구되며, 일부 태양전지판 비전개시 시스템 실패로 이어지는 등의 단점 또한 존재한다.

본 연구에서는 극초소형 위성으로 분류되는 큐브위성의 제한된 공간에서의 효율적 전력생성을 목적으로, 현재 주로 지상용으로 폭넓게 활용되고 있는 집광형 태양전력 (CPV: Concentrating PhotoVoltaic) 시스템에 주목하여 우주임무로의 적용 가능성을 검토하였다. 일반적으로 지상용 CPV 시스템은 집광 렌즈 및 미러 등의 광학계를 이용하여 태양광의 굴절 및 반사를 통해 좁은 면적의 태양전지에 최대 수백배에 이르는 높은 배율의 태양광을 조사시킴으로서 태양전지 면적 대비 고효율 전력생산이 가능하다. CPV 시스템 적용에 따라 종래의 태양광 발전방식과 비교하여 태양전지의 설치면적을 획기적으로 줄일 수 있으며, 보다 저렴한 비용으로 전력생산이 가능하여 미국과 유럽 등의 태양광 에너지 시장에서도 해당 기술의 수요 및 관련 연구가 점차 증가하고 있는 추세에 있다 [3-4]. 그러나 지상용 CPV 시스템은 고집광을 위한 광학계의 대형화, 집광된 태양전지셀의 고효율 유지를 위한 냉각시스템, 그리고 태양추적 시스템의 추가적 설치가 요구되는 등 이를 우주임무에 적용하기에는 아직까지 많은 기술적 제한요소가 존재한다. 특히, 무게 및 공간이 매우 제한적인 큐브위성에 상기의 지상용 CPV 기술을 적용하기에는 현 단계에서는 실현이 매우 어려울 것으로 판단된다.

본 논문에서는 CPV 시스템의 우주적용을 위해 먼저 궤도상에서 위성의 공전 또는 자전에 따라 태양전지판에 입사되는 태양광의 각도가 변화하는 조건에서도 태양전지판 외곽에 일정 경사각으로 배치된 집광형 렌즈어레이를 이용해 효율적인 전력생성이 가능한 극초소형 위성용 CPV 시스템을 제안하였다. 즉, 태양광의 입사각 변화에 따라 전력생성이 원활하지 않은 조건인 태양전지판과

태양광이 이루는 β 각이 0° 인 경우, 태양전지판 외곽에 배치된 집광형 렌즈어레이를 이용해 태양광을 태양전지판에 굴절 및 조사하여 효율적 전력생성이 가능하고, β 각이 90° 로 전력생성에 있어 유리한 조건에서는 배치된 렌즈 어레이가 전력생성에 지장을 주지 않는 CPV 시스템을 고안하여 상용 배열형 렌즈와 태양광 모사장치를 이용한 기능시험을 통해 CPV 시스템의 극초소형 위성으로의 적용 가능성을 입증하였다.

II. 본 론

2.1 지상용 CPV 시스템 개요

지상용 CPV 시스템은 종래의 태양광 발전 방식의 태양전지 제조비용으로 인한 높은 초기 설치비용 문제를 해결하기 위하여 광학계의 굴절 및 반사를 통해 집광된 태양에너지를 일반적으로 100cm²에서 1mm²에 이르는 좁은 면적의 태양전지에 조사하여 태양전지 면적 대비 발전효율을 높이고자 시작되었다. CPV 시스템의 집광 방식은 크게 반사경과 프레넬렌즈를 이용하는 방식으로 구분된다.

Figure 1과 같이 반사경을 이용하는 집광방식은 초점부에 설치된 태양전지에 집광이 가능하도록 단일 또는 복수개의 파라볼라 형태의 반사

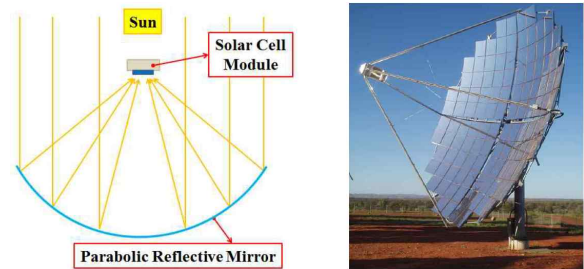


Fig. 1. Example of On-ground CPV System Applications Using Reflective Mirror System [5]

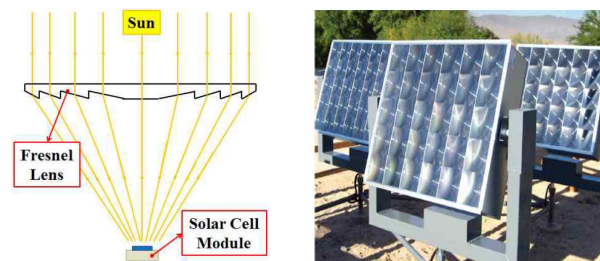


Fig. 2. Example of On-ground CPV System Applications Using Fresnel Lens System [6]

경을 적용한다. 일반적으로 수십 cm 가량의 단일 반사경만을 적용하거나, 높은 에너지를 얻기 위하여 복수개의 반사경을 단일초점 형성이 가능하도록 넓은 면적으로 배열하여 집광된 태양광으로부터 태양열 발전을 병행하여 효율을 극대화하기도 한다[4].

Figure 2와 같은 프레넬 렌즈를 이용하는 집광방식은 프레넬 렌즈어레이를 통해 집광된 태양광이 이와 일정 초점거리를 두고 렌즈 어레이와 수평하게 배치되어있는 좁은 면적의 태양전지에 집광되어 고효율로 전력을 생성한다. 일반적으로 Fig. 2와 같이 매트릭스 형태의 프레넬 렌즈 어레이를 이용하여 집광모듈을 반복적으로 배열하여 전력효율을 극대화한다. 본 방식은 간단한 시스템 구성으로 인하여 현재까지 가장 많이 상용화 되어있는 방식 [7-8]이며, 효율증가를 위하여 반사경 및 광파이프 등의 2차 광학계와 조합하여 사용하기도 한다.

태양에너지 집광 시, 종래의 Si 계열 태양전지는 태양전지의 열화현상으로 인한 급격한 성능저하의 한계가 존재하였으나, 우주용 고효율 태양전지로도 활발히 적용되고 있는 화합물 태양전지 및 다중접층 태양전지의 개발로 수백배 이상의 집광을 하더라도 열화현상 없이 고효율 유지가 가능하여 상용 CPV 시스템의 경우 일반적으로 200배에서 1000배까지의 고집광 수행이 가능하다[9].

2.2 큐브위성 적용을 위한 CPV 시스템

상기의 지상용 CPV 시스템을 우주임무에 적용할 경우, 태양전지 조사면적과 초점거리 확보에 따른 광학계 크기의 증가로 위성 탑재가 어려울 것으로 판단된다. 위성에 탑재를 위해서는 전개형 광학계를 비롯해 발사환경에서 이를 견고히 구속하기 위한 구속/분리 메커니즘의 적용이 추가적으로 요구되는 등 시스템의 복잡화와 이에 따른 신뢰도 저하가 예상된다. 광학계 공간 효율 극대화를 위해 렌즈 직경이 수 mm인 배열형 렌즈를 태양전지와 근접한 전면부에 배치하여 집광을 수행하더라도 배열형 렌즈 전체의 투과율 손실 및 태양전지에 조사되는 초점부 외의 그림자 발생으로 전력 생성효율이 오히려 저하되는 문제점 또한 존재할 수 있다. 이 외에도 고집광에 따른 태양전지의 발열로 인한 전력생성효율 저하를 방지하기 위하여 태양전지 모듈에 방열판 및 히트파이프 등의 냉각장치의 설치가 요구된다. 또한, 고집광을 통한 전력생성효율 극대화를 위해서는 가능한 광학계 모듈과 태양광이 이루는 각도가 90° 유지가 가능하도록 태양추적을 위한 센서 및 구동장치의

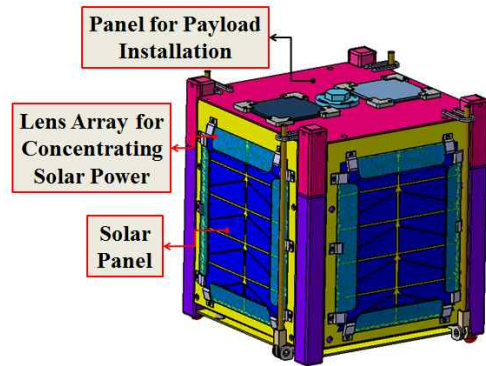


Fig. 3. Example of 1U CubeSat with CPV System

적용이 필수적으로 요구된다. 이와 같은 제약조건으로부터 지상용 CPV 시스템 운용개념을 우주임무에 적용함에 있어서는 현실적으로 설계 효율성 측면에서 많은 제약이 존재함을 알 수 있다. 특히, 크기 및 무게가 가장 큰 설계 제한요소로 작용하는 큐브위성에 이를 적용하기 위해서는 새로운 접근 방법이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 크기 및 무게의 제한으로 전력생성에 어려움이 존재하는 큐브위성에 CPV 시스템을 적용하여 태양광 사각지대에서의 전력생성 효율을 개선하고자 Fig. 3과 같이 CPV 시스템이 적용된 큐브위성을 제안하였다. 배열형 집광렌즈는 태양전지판의 외측에 각각 일정 경사각 θ 로 배치되어, 태양광과 태양전지가 이루는 β 각이 0° 로 전력생성 측면에서 약조건에서도 집광렌즈에 입사되는 태양광을 태양전지로의 굴절 및 조사를 통해 전력생성 효율 증가가 가능한 방식을 제안하였다. 또한, 외곽에만 배치된 집광렌즈는 β 각이 90° 로 전력생성 측면에서 호조건에서도 집광렌즈의 투과율 손실 및 초점부 외의 그림자 발생으로 인한 전력 생성효율 저하를 최소화하여 집광렌즈를 적용하지 않을 때와 유사한 전력생성 효율이 보장 가능하도록 고안되었다.

2.3 상용렌즈를 이용한 CPV 기능시험

2.3.1 CPV 기능시험 구성

Figure 4에 본 연구에서 제안한 CPV 시스템의 큐브위성 적용 가능성 검토를 위한 시험형상을 나타낸다. 태양광 모사를 위한 할로겐 램프, 태양전지판 그리고 태양전지판으로부터 생성된 전압 및 전류측정을 위한 멀티미터로 구성되는 태양광 시뮬레이터 (Solar Trainer Junior, Germany IKS사)를 기능 시험에 적용하였다. 태양광 시뮬레이터의 사양은 Table 1과 같으며, 광원과 태양전지판이 이루는 수직 회전방향 각도 (β)와 태양전지판을 기준으로 광

원의 수평 회전방향 각도 (α) 조절이 가능한 기능을 갖는다.

CPV 기능시험을 통한 큐브위성 적용 가능성 검토를 위해 상용 집광 렌즈어레이(DIYPRO사, FM30-680)를 Fig. 4와 같이 광원으로부터 가까운 태양전지 외곽에 일정 경사각을 갖도록 배치하고, 광원과 태양전지의 α, β 각도변화 시, 집광렌즈어레이 유무에 따른 기능시험을 수행하여 각각

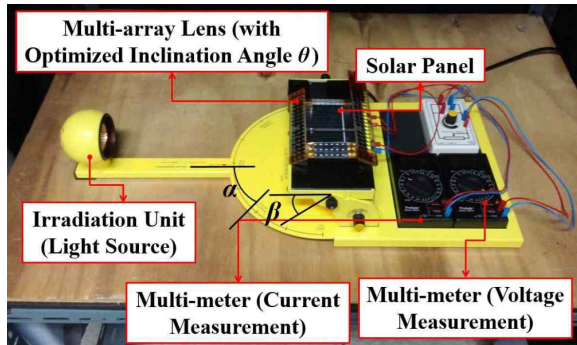


Fig. 4. CPV Test Set-up Using Commercial Multi-array Lens and Solar Simulator

Table 1. Specification of Solar Simulator

Product	Solar Trainer Junior (IKS, Germany)
Power Source	Halogen Lamp (Osram)
Irradiation	150 W/m ²
Solar Cell	Polycrystalline Si Solar Cell
Cell V _{oc}	0.5 V (per Cell)
Cell I _{sc}	1.5A (1000 W/m ²)
Cell Size	5cm×10cm (4 Cell)

Table 2. Specification of Commercial Lens Array

Name	Convex Multi-Array Lens
Material	PMMA (Poly Methyl Methacrylate)
Dimension (mm)	30 × 189 × 5
Focal Length (mm)	29.88
Transmission	92% (from 400–1100nm)

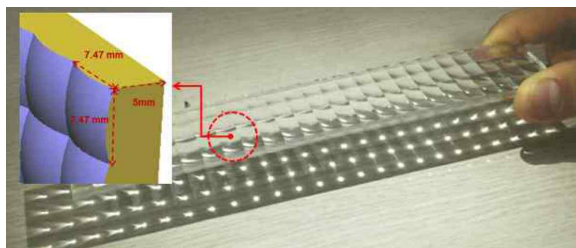


Fig. 5. Configuration of Commercial Multi-array Lens

의 조건에서의 전압과 전류 특성곡선을 획득하여 전력생성량을 비교하였다. CPV 기능시험에 적용된 상용 집광 렌즈어레이의 형상은 Fig. 5와 같으며 Table 2에 렌즈의 제원을 나타낸다.

2.3.2 CPV 기능시험 결과

CPV 시스템 적용에 따른 전력생성 효과 검토를 위해 상기의 시험 장치를 이용한 기능시험을 통해 다양한 각도변화에 따른 렌즈 집광 시와 비 집광 시의 전력생성 효과를 비교하였다.

Figure 6은 궤도상에서 위성의 공전 또는 자전으로 인해 태양광과 태양전지가 이루는 각도가 $\beta=0^\circ$ 로 전력생성 측면에서 불리한 경우, 집광 렌즈어레이 적용에 따른 전력생성 효과를 검증하기 위한 시험구성을 나타낸다. Fig. 6과 같이 집광 렌즈어레이 설치각도(θ)의 변화에 따라 $\beta=0^\circ$ 인 조건에서 집광 렌즈어레이를 통해 태양광을 태양전지로 굴절 및 조사시킬 경우, 본 연구에서 의도하는 전력생성효율 증가 가능성여부 및 최적화 설치각도를 확인하였다. Fig. 7은 집광 렌즈어레이 유무에 따른 전압과 전류 측정결과로부터 비집광

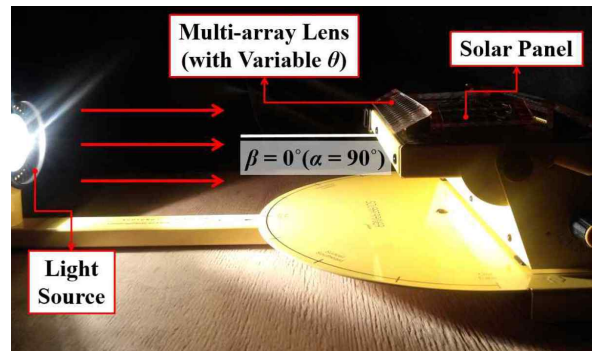


Fig. 6. Test Set-up for $\alpha=90^\circ, \beta=0^\circ$ with Variable θ angle

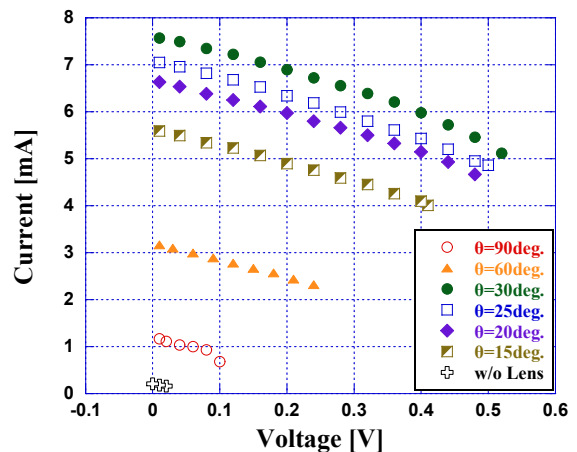


Fig. 7. Test Results for $\alpha=90^\circ, \beta=0^\circ$ with Variable θ angle

시와 비교하여 본 논문에서 제안한 집광 렌즈어레이 배치에 의한 집광 시 $\beta=0^\circ$ 인 조건에서 $\theta=30^\circ$ 일 때 약 887배로 최대의 전력증가 효과가 발생함을 알 수 있었으며, $\theta=30^\circ$ 이상 또는 그 이하의 각도에서는 전력생성이 저하되는 경향을 보여 $\theta=30^\circ$ 를 최적화 설치각도로 판단하였다.

Figure 8은 β 와 θ 가 Fig. 6과 동일한 조건에서 태양전지판을 기준으로 광원의 회전방향 각도 α 만이 변화할 때 집광 렌즈어레이 적용에 따른 전력생성 효과를 검증하기 위한 시험구성을 나타낸다. Fig. 9는 α 각도 변화 시 ($\alpha=67.5^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 0^\circ$) 집광 렌즈어레이 유무에 따른 전력생성 효과를 나타낸 것으로 Fig. 6의 $\alpha=90^\circ$ 시와 비교하여 집광효율이 저하됨에도 불구하고 태양전지의 총 네 방향의 가장자리에 렌즈가 배치됨으로 인하여 모든 시험 각도에서 렌즈 비집광 시와 비교하여 약 300배 이상의 전력생성효율 증가가 가능함을 알 수 있다.

Figure 10은 태양광과 태양전지가 이루는 각도 $\beta=90^\circ$ 로 전력생성 측면에서 유리한 경우, 태양전지 외곽에 배치된 집광 렌즈어레이가 전력생

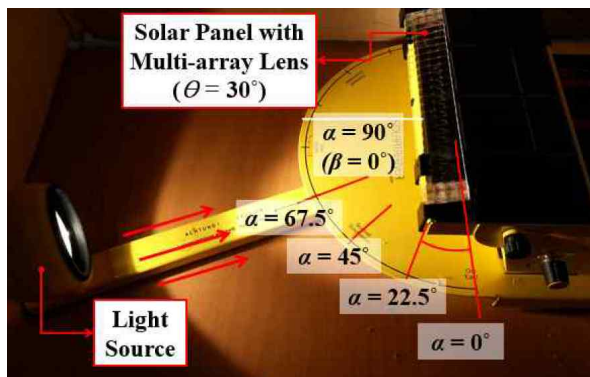


Fig. 8. Test Set-up for $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, \beta=0^\circ$ and $\theta=30^\circ$

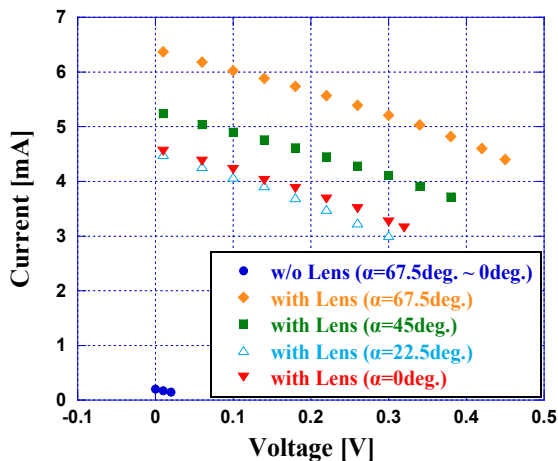


Fig. 9. Test Results for $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, \beta=0^\circ$ and $\theta=30^\circ$

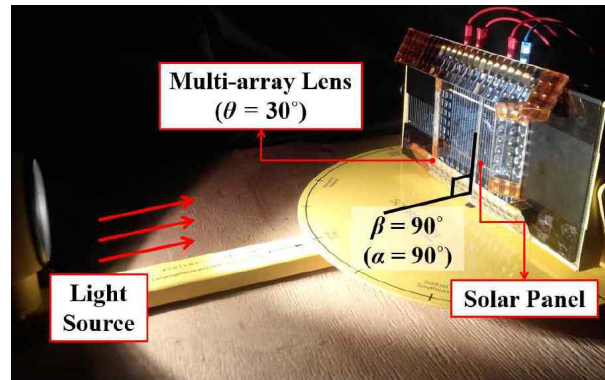


Fig. 10. Test Set-up for $\alpha=90^\circ, \beta=90^\circ$ and $\theta=30^\circ$

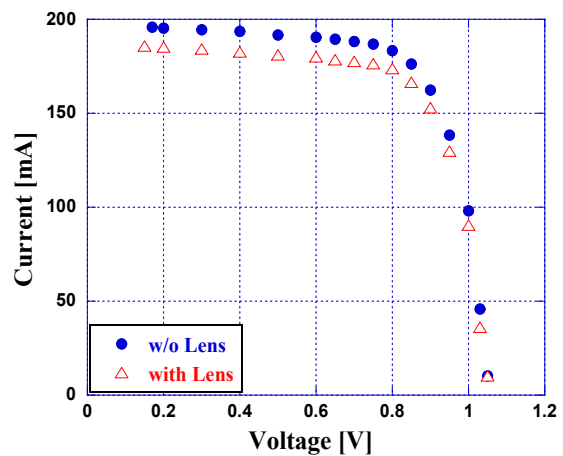


Fig. 11. Test Results for $\alpha=90^\circ, \beta=90^\circ$ and $\theta=30^\circ$

성 효율을 저하시키는지를 확인하기 위한 시험형상을 나타낸다. Figure 11은 이에 대한 시험결과로 전면부에 배치된 집광 렌즈어레이로 인해 태양전지 일부 면적이 가려졌음에도 렌즈어레이 배치 시 전력생성량은 5.5%의 저하만을 보여 태양전지의 전력생성에 거의 영향을 주지 않아 집광 렌즈어레이 존재에도 불구하고 $\beta=90^\circ$ 일 경우의 태양전지 전력생성의 저하가 거의 없이 본래의 효율 유지가 가능함을 확인할 수 있다.

집광형 태양전력시스템의 극초소형 위성 적용 가능성 검토를 위해 상용 집광 렌즈어레이와 태양모사기를 적용한 기능시험결과를 Table 3에 정리한 것으로, 각 시험각도 별 전류와 전압 특성그래프로부터 최대전력 시의 전압(V_{max}) 및 전류(I_{max}) 값을 나타낸 것이다. 집광 렌즈어레이의 최적화 설계가 실시되지 않았음에도 불구하고 태양광과 태양전지가 이루는 각도가 0° 로 전력생성이 불리한 조건일 경우에도 태양전지 외곽에 배치된 집광 렌즈어레이가 태양광을 효율적으로 굴절 및 조사하여 전력생성 효율 향상이

Table 3. Test Results Summary

Incidence Angle		w/o Multi-array Lens		with Multi-array Lens	
α	β	V_{max} (V)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	I_{max} (mA)
67.5°	0°	0.02	0.16	0.45	4.4
45°				0.38	3.71
22.5°				0.3	3.01
0°				0.32	3.15
90°	0°	0.02	0.16	0.52	5.12
	90°	0.85	176.20	0.85	166.48

가능함을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 렌즈어레이 배치방법은 태양광과 태양전지가 이루는 각도가 90°로 전력생성이 유리한 조건일 경우, 태양전지 전력생성에 미치는 영향을 최소화하여 태양전지 본래의 최대 전력생성효율 유지가 가능함을 확인하였다.

III. 결 론

위성의 공전과 자전에 의해 태양광과 태양전지판이 이루는 β 각이 0°로 전력생성에 있어 불리한 조건에서는 집광 렌즈어레이를 통해 효율적 전력생성을 수행하며, β 각이 90°로 전력생성이 유리한 조건에서는 집광 렌즈어레이가 태양전지 전력생성에 미치는 영향을 최소화하여 태양전지 본래의 최대 전력생성효율 유지가 가능한 집광형 태양전력시스템을 제안하였다. 극초소형 위성으로의 적용 가능성 검토를 위해 상용 집광 렌즈어레이와 태양광 시뮬레이터를 이용한 기능시험을 실시하였다. 기능시험결과, 태양광과 태양전지판이 이루는 β 각이 0°와 90° 조건에서 설계가 의도한 대로 기능이 구현됨을 확인하였다. β 각이 0°인 조건에서는 렌즈 비집광 시에 비해 집광 시 약 887배의 전력생성 증가가 가능함을 확인하였다. 또한, β 각이 90°로 태양전지가 최대의 전력생성이 이루어지는 경우에도 집광 렌즈어레이에 의한 전력생성효율 저하가 거의 없이 태양전지의 전력생성효율이 유지됨을 확인하였다. 기능시험 결과로부터 극초소형 위성 적용을 목적으로 하는 집광형 태양전력시스템의 유효성을 확인하였다. 향후, 렌즈어레이 최적화 설계 시 전력생성효율이 향상될 것으로 예상되며, 추후 우주적용 시 우주용 렌즈 재질 선정이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 논문에서 수행되어진 기능시험 결과

를 기반으로 집광형 태양전력시스템의 큐브위성 적용 시의 위성의 궤도 및 자세프로파일에 따른 전력생성 증가량 추정 및 분석을 수행할 예정이다.

References

- 1) Ashida, H., Fujihashi, K., Inagawa, S., Miura, Y., Omagari, K., Miyashita, N., Matunaga, S., Toizumi T., Kataoka J., Kawai, N., 2010, "Design of Tokyo Tech Nano-satellite Cute-1.7+APDII and its Operation", Acta Astronautica, Vol. 66 No. 9, pp. 1412~1424.
- 2) Yu, S. Y., Kim, Y. H., Yoon, J. W., Seon, J. H., Jin, H., Lee, D. H., Robert. P. L., Thomas R. I., Kim, J., 2012, "Initial Operational Scenario of TRIO-CINEMA Spacecraft", Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 2012 No. 4, pp. 1053~1058.
- 3) Bernard S., Mico P., Jon J., Sagar G., and Terry Z., May 2011, "A Cost-effective High Intensity Concentrated Photovoltaic System", Energytech, 2011 IEEE, pp. 1~6.
- 4) Feuermann, D., Gordon, J., 2001, "High-concentration Photovoltaic Designs Based on Miniature Parabolic Dishes", Solar Energy, Vol. 70 No. 5, pp. 423~430.
- 5) <http://newenergyportal.wordpress.com/page/3>
- 6) http://hi-globe.com/?page_id=624
- 7) Benítez, P., Miñano, J., Zamora, P., Mohedano, R., Cvetkovic, A., Buljan, M., Chaves, J., Hernández, M., April 2010, "High Performance Fresnel-based Photovoltaic Concentrator", Optics Express Vol. 18 No. S1, pp. A25~A40.
- 8) Ryu, K. S., Shin, G. H., Cha, W. H., Kang, S. W., Kim, Y. S., Kang, G. H., 2010, "Design and Manufacturing of Fresnel Lens for High Concentration Solar PV System", Journal of The Korean Solar Energy Society, Vol. 2010 No. 11, pp. 331-336.
- 9) Oh, B. D., 2008, "High Efficiency III-V Concentrating Photovoltaic", Physics and High Technology, Vol. 17 No. 7/8, pp. 37~41.