

발 간 등 록 번 호

11-1543000-002140-01

## 원추형 태양광-열(CPV/T)복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치 개발

Development of the Energy Independent Dryer for Agricultural Products  
Using Conical CPV/T Combined Solar Concentrating System

최종보고서

2017. 12. 17

주관연구기관 / 강원대학교  
참여연구기관 / (주)나우솔리드

농림축산식품부

첨단생산기술개발사업

R&D Report

# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치 개발”(개발기간: 2015. 12. 18 ~ 2017. 12. 17)과제의 보고서로 제출합니다.

2017년 12월 17일

주관연구기관명 : 강원대학교 산학협력단 정재연(인)



참여기관명 : (주)나우솔리드 김용식(인)



주관연구책임자 이귀현(인)



참여기관책임자 김용식(인)



국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

과제고유번호	115063-2	해당단계 연구기간	2016. 12. 18 ~ 2017. 12. 17	단계구분	2단계/(총 2단계)
연구사업명	단위사업	농식품기술개발사업			
	사업명	첨단생산기술개발사업			
연구과제명	대과제명	(해당 없음)			
	세부 과제명	원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치 개발			
연구책임자	해당단계 참여 연구원 수	총: 8명 내부: 5명 외부: 3명	해당단계 연구개발비	정부: 90,000천원 민간: 30,000천원 계: 120,000천원	
	총 연구기간 참여 연구원 수	총: 11명 내부: 8명 외부: 3명	총 연구개발비	정부: 180,000천원 민간: 60,000천원 계: 240,000천원	
연구기관명 및 소속부서명	강원대학교 바이오시스템공학과			참여기업명: (주)나우솔리드	
위탁연구	연구기관명: 없음			연구책임자: 이귀현	
<b>&lt;요약&gt;</b> - 단일 모듈의 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 개발 및 성능분석 - 다 모듈의 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 개발 및 성능분석 - 다 모듈의 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치 개발 및 건조장치 운전특성과 농산물 건조특성 분석 - 다 모듈의 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치의 에너지 경제성 분석				보고서 면수: 147	

## 국문 요약문

	코드번호	D-01			
연구의 목적 및 내용	<p>집광효율을 극대화한 원추형 태양광 집광기 요소기술을 개발하고, 원추형 집광기의 고집광부 흡수기 표면에 집광형 태양전지(CPV)를 설치한 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 설계·제작하여 성능검증 후 농산물 건조장치에 적용하여 실증실험을 수행하며, 시설비 및 유지보수 관리비를 포함한 에너지 경제성 분석을 통해 개발된 원추형 복합 집광시스템을 이용한 건조장치를 실용화하는데 있음.</p>				
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>-반사율 96.56%를 갖는 알루미늄 반사판을 이용한 45도 각의 원추형 반사판 및 AI 프로파일을 이용한 반사판 지지대 설계/제작</li> <li>-Linear Actuator과 Slew Driver를 이용한 고도 및 방위 2축 정밀 태양추적장치 설비/열교환기를 내재 축열조 설비</li> <li>-고집광부에 CPV셀 부착 및 셀 간 직렬배선</li> <li>-CPV 과열방지 및 집광을 향상을 위한 보조집광기 설계/설비</li> <li>-원추형 반사판, CPV셀, 흡수기를 일체화하여 모듈화 설비</li> <li>-CPV셀 부착 원추형집광기 1개 및 4개로 구성된 단일, 다 모듈 집광시스템 설계/설비</li> <li>-다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템용 태양추적장치 설비</li> <li>-CFD분석을 통한 흡수관 내 열매체 온도 분석(20~21°C)</li> <li>-열화상분석에 의한 흡수관 표면 CPV셀 온도 분석 45°C이하</li> <li>-최적 열매체 유량 분석: 4L/min</li> <li>-단일 모듈 원추형 복합시스템 합산효율: 78%(집열율: 57%, 발전효율: 21%)</li> <li>-다 모듈 원추형 복합시스템 합산 효율: 76%(집열효율: 56%, 발전효율: 20%)</li> <li>-건조실 크기 및 재료 선정, 공기 순환유로 결정, 건조실 구조 설계 및 제작</li> <li>-건조온도 제어를 위한 유량제장치 및 건조온도 제어장치 설비</li> <li>-태양광 발전 부대설비</li> <li>-다 모듈 원추형 집광기, 태양추적장치, 축열조, 열교환기, 건조장치 설계/제작</li> <li>-축열조 및 건조실 유로설계/설비</li> <li>-순환펌프, 밸브, 유량계 등으로 구성된 유체순환 배관설비</li> <li>-온수 순환 유동관과 일체화된 열교환기 설계 및 설비</li> <li>-건조장치 에너지 경제성분석</li> <li>-시스템 설비 수익성과 투자회수 기간 분석</li> </ul>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-집광형 태양전지(CPV)를 부착한 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템(CPV/T) 개발은 농업 시설에 필요한 열과 전기에너지를 동시에 생산할 수 있어 건조장치 뿐만 아니라 농업시설물(온실, 축사 등)의 난방 에너지원으로 이용될 수 있어 농가의 에너지난을 다소나마 해결하는데 기여.</li> <li>-기존 태양에너지시스템의 열 또는 전기 독립 생산 시스템의 경제성 문제점을 극복하고 세대교체를 이룰 수 있으며, 고효율의 열 및 전기 동시 생산 시스템으로의 전 환점을 마련할 수 있을 것임.</li> <li>-원추형 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 기업체에 기술 이전함으로써 기술로징수가 가능하며, 기업체의 독자적인 기술 확보 및 기업체의 주 생산기종이 될 수 있어 경제적 효과가 클 것임.</li> </ul>				
중심어 (5개 이내)	원추형 집광기	태양광-열 복합 집광시스템	집광형 태양전지	건조장치	태양에너지

## < SUMMARY >

		코드번호	D-02		
Purpose& Contents	<p>In this study, the objectives of this study were to develop the concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system with CPV solar cell with conical solar concentrator, and to construct an agricultural dryer with CPV/T system. The results obtained from this study are as follows:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Development for the concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system with one conical solar concentrator</li> <li>2. Development for the concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system with four conical solar concentrators</li> <li>3. Development of agricultural drying system with using four concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system</li> </ol>				
Results	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Average solar collecting efficiency of one conical solar concentrator system without CPV cell was 73.6%, 81.4%, and 78.5% for each flow rate of 2L/min, and 4L/min, 6L/min. Thus, The highest efficiency was at the flow rate of 4L/min.</li> <li>2. Solar collecting and electrical efficiency for one concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system at 4L/min with the highest solar collecting efficiency are each 57% and 21% with aggregated efficiency of 78%.</li> <li>3. Average solar collecting efficiency of four conical solar concentrator system without CPV cell was 68.0%, 70.0%, 66.7%, and 65.0% for each flow rate of 3L/min, and 4L/min, 5L/min. 6L/min. Thus, The highest efficiency was at the flow rate of 4L/min.</li> <li>4. Solar collecting and electrical efficiency for four concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system at 4L/min with the highest solar collecting efficiency are each 56% and 20% with aggregated efficiency of 76%.</li> <li>5. Drying temperature was kept within the error range of <math>\pm 2.0^{\circ}\text{C}</math> in compared with setting temperature.</li> <li>6. Result of economic analysis for agricultural dryer with using four concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system showed that it takes 9 year for economic advantage in the case of government support of 60% for construction cost.</li> </ol>				
Expected Contribution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system developed in this study can be used for heating of agricultural facilities in addition to agricultural dryer.</li> <li>2. It can be helpful for saving of energy cost for agricultural farms by using agricultural dryer with four concentrated photovoltaic-thermal (CPV/T) system developed in this research.</li> <li>3. It would give economic benefits to agricultural farms by using developed solar dryer.</li> </ol>				
Keywords	Conical concentrator	Concentrated photovoltaic-thermal system	concentrated solar cell	agricultural dryer	solar energy

## CONTENTS

Chapter 1 Concepts of research project -----	7
Section 1 Objectives and necessity of research -----	7
Section 2 Scope of research -----	19
Section 3 Achievement for research purpose of results -----	20
Chapter 2 Present status of research in Korea and foreign countries -----	21
Section 1 Research status in Korea -----	21
Section 2 Research status in foreign countries -----	22
Section 3 Position of study results on the status of research in Korea and foreign countries -----	24
Chapter 3 Contents and results of research -----	26
Section 1 Development of the CPV/T system -----	26
Section 2 Performance analysis of the CPV system -----	48
Section 3 Performance analysis of the CPV/T system -----	66
Section 4 Drying System with the CPV/T -----	70
Section 4 Results and discussion -----	86
Chapter 4 Achievement and contribution -----	117
Section 1 Achievement of research purpose -----	117
Section 2 Contribution to related fields -----	118
Chapter 5 Plane for the practical use of research results -----	120
Section 1 Plane for the practical use and industrialization -----	120
Section 2 Representative research results -----	122
Chapter 6 Compilation of scientific information from foreign countries -----	124
Section 1 Solar concentrating technology -----	124
Section 2 Technology of multi conjunction solar cell -----	130
Chapter 7 Class of security for research results -----	138
Chapter 8 Present status of research facilities and equipments -----	139
Chapter 9 Records of safety management of lab -----	140
Section 1 Safety checking -----	140
Section 2 Study and training for safety -----	140
Chapter 10 References -----	141

## < 목 차 >

제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표 -----	7
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 -----	7
제 2 절 연구개발의 범위 -----	19
제 3 절 연구성과 목표 대비 실적 -----	20
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	21
제 1 절 국내 기술개발 현황 -----	21
제 2 절 국외 기술개발 현황 -----	22
제 3 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 -----	24
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 -----	26
제 1 절 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발 -----	26
제 2 절 원추형 집광시스템 성능분석 -----	48
제 3 절 원추형 태양광-열 복합시스템 성능분석 -----	66
제 4 절 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치 -----	70
제 5 절 결과 및 고찰 -----	86
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 -----	117
제 1 절 연구개발목표의 달성도 -----	117
제 2 절 관련분야에의 기여도 -----	118
제 5 장 연구개발 성과 및 활용계획 -----	120
제 1 절 실용화 및 산업화 계획 -----	120
제 2 절 연구과제의 대표적 연구실적 -----	122
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보 -----	124
제 1 절 다중집합 태양전지 기술 -----	124
제 2 절 태양열 집광기술 -----	130
제 7 장 연구개발결과의 보안등급 -----	138
제 8 장 연구시설·장비 현황 -----	139
제 9 장 연구실 안전관리 이행실적 -----	140
제 1 절 안전점검 -----	140
제 2 절 교육 및 훈련 -----	140
제 10 장 참고문헌 -----	141

# 제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표

## 제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 목적

본 연구개발의 목표는 집광효율을 극대화한 원추형 태양광 집광기 요소기술을 개발하고, 원추형 집광기의 고집광부 흡수기 표면에 집광형 태양전지(CPV)를 설치한 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 설계·제작하여 성능검증 후 농산물 건조장치에 적용하여 실증실험을 수행하며, 시설비 및 유지 보수 관리 비를 포함한 에너지 경제성 분석을 통해 개발된 원추형 복합 집광시스템을 이용한 건조장치를 실용화하는데 있다.

### 2. 연구의 개요

- 원추형 반사판에 의해 태양광을 중심부로 집광시키고, 중앙의 태양광 집광부위에 흡수기를 설치하여 태양 복사열을 회수하는 장치인 고 효율의 원추형 태양광 집광기를 개발함.
- 태양복사열 회수장치인 동관의 흡수기의 태양복사열 회수를 극대화하고, 대기로의 대류 열 손실을 최소화함.
- 가시광선 및 적외선 영역에서 태양광 발전효율이 탁월한 10mm × 10mm 크기의 고 효율 집광형 태양전지(CPV: 발전효율 37%)를 흡수기의 고 집광부 표면에 설치하여 태양광 발전을 극대화함.
- 고 효율의 태양광 발전과 태양열 집열이 동시에 가능한 원추형 태양광-열 복합 집광기를 태양추적장치에 설치하여 태양광을 일출에서 일몰시까지 장시간 집광이 가능하도록 함으로서 시스템효율을 극대화함.
- 태양복사에너지 흡수율이 95%인 CPV(Concentrated PhotoVoltaics)셀 하부에 설치된 흡수기를 통해 태양복사열을 회수함으로써 CPV셀 냉각으로 인한 태양광 발전효율을 극대화할 뿐만 아니라, CPV셀 미 부착 흡수기 표면에 집광된 태양복사열을 회수 및 이용함으로써 한 시스템에서 전기와 열을 동시에 생산하여 농산물 건조장치의 에너지원으로 이용하는 태양광 발전과 태양열 집열이 복합된 에너지 자립형 건조장치 개발.

- 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템의 주요 구성요소는 태양광을 집광시키는 원추형 반사판, 열전달 기구인 흡수기, 고 효율의 태양광 발전을 위한 CPV셀, 태양 추적장치, 축전지, 직류를 교류로 변환하기 인버터, 열전달매체, 축열장치 및 보조가열기 등으로 구성.
- 이중열교환기 형태로 제작될 흡수기 내에 액체식 열전달 매체를 순환시켜 태양 복사열을 회수하여 축열장치에 저장하고, 축열량이 부족할 때 보조가열기를 사용.
- 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템에서 생산된 자체 전력을 이용하여 태양 추적장치 및 보조 가열기 등을 가동하는 에너지 자립형 농산물 건조장치 구축.
- 태양에너지를 이용한 태양열 집광 및 태양광 발전 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 건조장치의 개념도<그림 1-1>.



<그림 1-1> 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 이용 농산물 건조장치 개념도.

### 3. 연구개발의 필요성

우리나라의 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가추세로 국내 소비 에너지 사용량의 97%이상이 수입에 의존하고 있는 실정이며, 지구 환경문제와 관련하여 지구 온난화의 원인 중 화석연료(화석에너지의 단위 열량당 CO<sub>2</sub> 발생량은 석탄 0.098 g/kcal, 석유 0.079g/kcal, 천연가스 0.056 g/kcal)에 따른 영향이 55% 이상을 차지하고 있다. 특히 이 중에서 화석연료에서 발생하는 이산화탄소에 의한 지구온난화현상(지구 온난화에 대한 온실가스의 기여도 CO<sub>2</sub> 55%, CFC-11 17%, CFC-12 7%, CH<sub>4</sub> 15%, N<sub>2</sub>O 6%)이 가장 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제들의 해결의 일환으로 각 국에서는 에너지 절약 기술과 아울러 대체에너지의 개발에 중단 없는 노력을 경주하고 있다.

현대의 주된 에너지원인 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료 매장량에 대한 한계성, 이의 부산물로 발생하는 공해 등을 생각하여 볼 때 가까운 장래에 닥칠 심각한 에너지난과 환경상의 제약으로 인한 파국을 벗어나기 위하여 무공해이며 무궁무진한 태양에너지에 대한 연구 개발이 촉진되고 있고, 기술적인 면에서 이용 가능성이 입증되었으며, 부분적으로 태양에너지 이용 기기의 생산이 이루어지고 있다. 현재, 우리나라의 산업은 에너지 집약형 산업으로 변하고 있다. 그러나 에너지원이 한정되어 있는 우리나라의 현실로 볼 때 에너지원의 확보를 위한 대책이 명확하게 수립되어 있지 못한 실정에서 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 우리나라의 에너지 자원 확보는 지속적으로 대두될 문제라는데 심각성이 크며, 이 때문에 관계 정부당국에서는 면세유 확대공급, 대체에너지원 개발, 에너지 절약형 설비시스템 구축 등 다각적인 노력을 강구하고 있다. 그러나 이러한 노력은 단기적이어서는 안 되며, 장기적이고, 항구적인 에너지 수급대책이어야 한다. 이를 위해서는 근본적으로 대체에너지 개발, 에너지원의 다양화, 부존자원 이용의 극대화가 이루어지지 않으면 안 된다.

우리나라는 지리적인 위치와 계절적 기후조건이 연중 태양에너지를 충분히 공급받을 수 있으며 특히 동절기에는 날씨가 건조하고 맑아 태양 복사량이 많은 편이어서 태양열 이용에 매우 유리하다. 그러므로 대체에너지로서 고 효율 태양에너지 이용분야의 실용기술을 개발하여 농산업적 이용뿐만 아니라 전 산업 분야의 에너지원으로서의 확대 및 보급이 절실한 실정이다.

태양에너지는 다른 에너지원에 비하여 단위면적당 에너지 밀도가 낮고 날씨의 영향을 많이 받기 때문에 경제성을 확보하기가 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 태양에너지가 가지고 있는 청정성, 무한성 등의 장점과, 차세대 대체에너지로서의 충분한 발전 가능성으로 인해 정부 차원에서도 많은 연구비를 투자하고, 관련 산업을 발전시키기 위해 여러 가지 지원정책을 시행하고 있다. 현재 진행되고 있는 태양광 발전 연구는 발전 단가를 낮추는 저가형 태양전지 연구 개발과, 변환 효율을 높이는 고효율 태양전지 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 고효율 태양전지 분야 중 다중접합 구조의 III-V족 셀은 독일 Fraunhofer ISE에서 최고 효율 41.1%을 기록했으며, 최근 독일의 아주르 스페이스 파워(www.azurspace.com)가 500 배의 집광비를 이용해 43.3% 효율을 달성한 새로운 다중접합 태양전지를 출시했으며, 미국과 일본에서도 40%에 근접하는 연구 결과를 발표하고 있다. 이처럼 고효율 III-V족 집광형 태양전지 분야는 실용화를 목표로, 셀 자체에 대한 특성 연구와 집광방법, 냉각성능, 추적장치 등의 개선을 통한 효율 향상 연구, 장기 사용을 위한 내구성 확보 방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 태양전지 기술과 병행하여 태양열을 직접 이용하는 집열기술에 있어서도 평판형 집열기가 이미 오래전부터 실용화 되고 있으며, 좀 더 높은 온도로 집열 할 수 있는 집광형 집열기에 대한 연구도 활발하

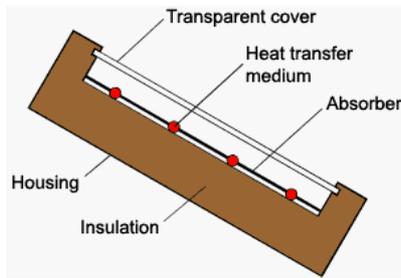
게 진행되고 있다. 그러나 위와 같은 연구들 중 III-V족 화합물 반도체 태양전지 분야는 주로 CPV(Concentrated PhotoVoltaic) 셀의 온도를 낮춰 효율을 향상시키기 위한 연구가 대부분이며 냉각된 에너지를 활용하는 방안에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 태양광 발전과 태양열 집광이 복합된 연구 분야로 고 집광을 위한 집광장치로 원추형 집광기를 이용하고, 고 효율의 태양광발전용 집광형 태양전지(CPV셀)를 집광기의 고 집광부 표면에 설비하여, 한 시스템에서 고 효율의 태양열 생산과 동시에 태양광 발전이 가능한 원추형 복합 집광시스템을 개발하여 농산물 건조장치의 에너지원으로 이용하고자 하며, 이러한 시스템은 일반가정용 온수급탕용, 냉난방 및 산업 공정열 분야와 발전분야 등 다양한 적용분야의 설비에 이용될 수 있을 것이다.

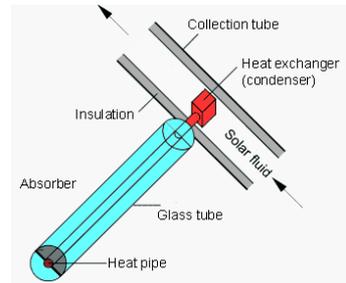
본 연구의 필요성을 기술적인 측면, 경제·산업적인 측면, 사회·문화적 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 기술적 측면

- 태양은 100년 전이나 지금이나 마찬가지로 우리에게 무한정한 청정에너지를 제공하고 있으며, 단지 태양에너지 밀도가 산업사회의 발달로 인하여 대기의 환경오염이 가중되어 지표면까지 도달하는 동안 산란과 흡수가 많이 일어나는 것을 빼고는 별로 변한 것이 없음.
- 태양은 봄, 여름, 가을, 겨울의 주어진 고도와 방위각에 따라 태양의 궤도를 따라 일정하게 움직이고 있으며, 이러한 태양에너지를 이용하여 산업 에너지원으로 이용하는데 사용료가 전혀 요구되지 않음.
- 태양열의 이용을 위해 단지 응용분야와 규모에 따라 단위 면적당 이용효율을 높이기 위해서 고효율의 기기를 제작하는데 드는 비용이 전부이며, 예로 고효율의 태양열 집열기 또는 집광기, 태양연못(Solar Pond) 등이 태양에너지를 효과적으로 직접 이용하는데 필요한 기기들임.
- <그림 1-2>과 같이 현재 실용화 되고 있는 평판형 태양열집열기는 비교적 열손실이 크기 때문에 낮은 효율을 보이고, 진공관형집열기는 70℃이상에서 다소 이용이 가능하나 사용용도에 제한이 많고, 냉난방과 공정열 이용부분 및 발전에 적용하기 위해서는 중고온(150℃이상) 범위에서 높은 효율을 보이는 태양열 집광형 집열기가 매우 유리할 것임.



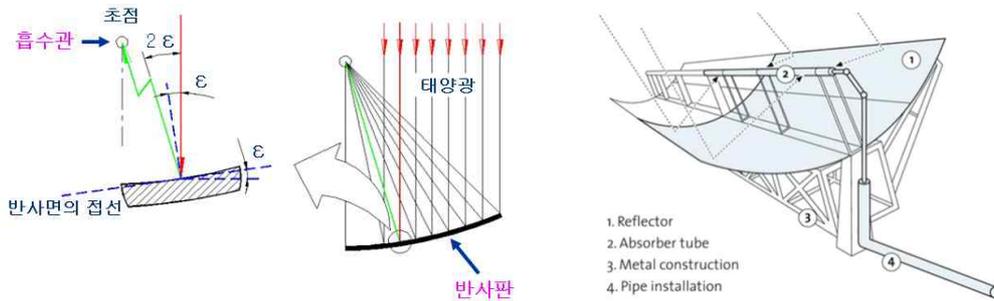
(a) 평판형 태양열집열기



(b) 진공관형 태양열집열기

<그림 1-2> 태양열집열기의 종류.

○ 현재 실용화 되고 있는 태양열 집광형 집열기는 표면적에 일사를 모으기 위해 접시형태나 원통형의 반사판을 갖는 집열기로 초점에 위치한 흡수기는 태양열을 흡수하며 이곳을 통과하는 열매체는 흡수기의 열을 빼앗아 축열조로 운반하게 되고 이 흡수기는 원통형의 집열기에 고정시키고 반사판이 태양을 따라 움직이게 하여 항상 흡수기에 에너지가 모이도록 되어 있어 특히 고온을 요하는 곳에 사용함<그림 1-3, 1-4>.



<그림 1-3> 집광의 기본 원리.



(a) 포물형 원통 집광기(PTC)



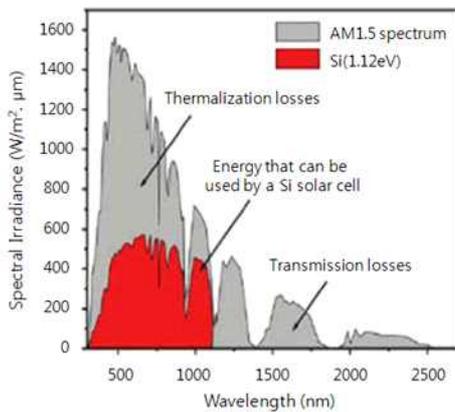
(b) 포물형 접시 집광기

<그림 1-4> 집광형 태양열집열기.

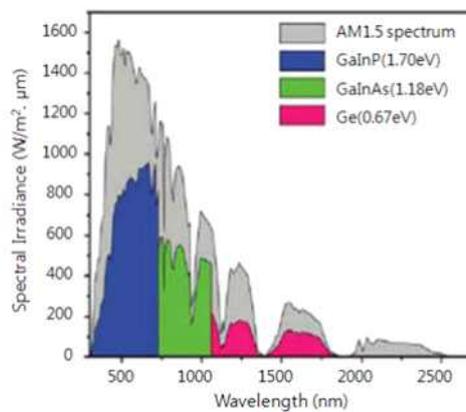
○ 실리콘 태양전지(PV)는 크게 단결정(single crystal) 형태와 다결정(polycrystalline) 형태의 재료로 나뉘며 기본적으로 p-n 동종접합(homo-junction)으로서 구성하여 사용됨.

○ 비정질 실리콘 태양전지(a-Si)는 가장 상업적으로 성공한 최초의 박막 형태의 태양 전지이며, 종류로는 CuInSe<sub>2</sub> 태양전지(CIS Cells), GaAs 태양전지, CdTe 태양전지 등이 있음.

○ 화합물 반도체 태양전지(CPV: 집광형태양전지)는 사용 물질에 따라 III-V족, II-III-VI족, 그리고 II-VI족 태양전지로 구분할 수 있으며, 이중에서 II-III-VI족 태양전지로는 CIGS(Cu(In,Ga)Se)가 대표적인 물질이고, II-VI족 태양전지로는 CdTe가 대표적이며, GaAs, InGaP를 기반으로 하는 III-V족 화합물 반도체 태양전지의 특징은 기존 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 높은 장점을 가지고 있음<그림 1-5>



(a) 단일접합 Si 태양전지(PV)

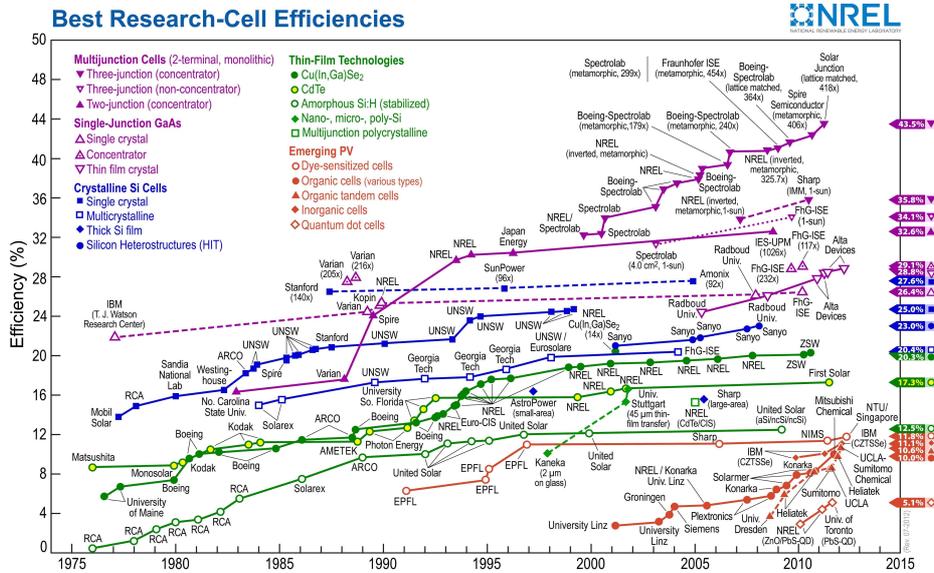


(b) 다중접합 태양전지(CPV)

<그림 1-5> 태양전지 구조에 따른 광 흡수 대역.

○ III-V족 화합물 반도체 태양전지는 1980년 중반부터 개발이 시작되었고, 태양전지 효율은 매년 약 1%의 빠른 효율 향상을 보이고 있으며, 2007년에는 Spectrolab에서 격자부정합(metamorphic) 성장기법을 이용한 InGaP/GaAs/Ge 적층형 태양전지를 이용하여 효율 40.7%(240배 집광시)를 달성하였음.

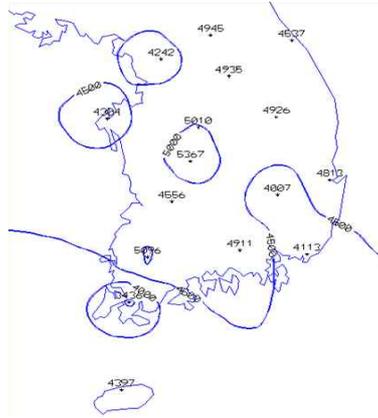
○ NREL(Natontional Renewable Energy Labortary)에서 2012년 발표한 태양전지의 최대 효율의 연도별 발전 현황은 다음과 같음<그림 1-6>.



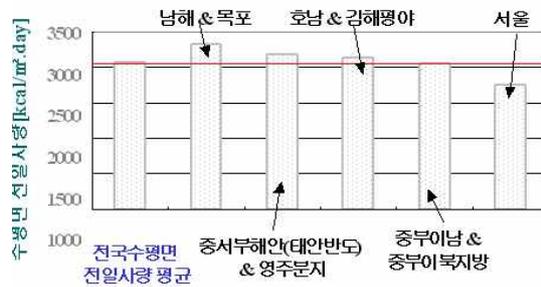
<그림 1-6> 2012년 NREL 발표 태양전지 최고 변환 효율.

#### 나. 경제·산업적 측면

- 우리나라의 평균일사량(수평면 전일사량)은 1 m<sup>2</sup> 당 하루 3천1백 칼로리로서 우리나라의 태양열 이용기술 개발의 성공 잠재적 여건을 제시하고 있음.
- 한편, 일사량 성분 중 직달일사량은 고 집광 에너지를 얻도록 설계되는 집광시스템과 통합된 집광형태양전지에 의한 태양열·전기 융합형 하이브리드 시스템 개발과 보급을 위해서 절대적으로 요구됨.
- 우리나라는 청명한 날 1 m<sup>2</sup> 당 하루 4천600 칼로리의 직달 일사 에너지를 받고 있는 것으로 나타났고, 연평균 1일 전일사량은 3,065kcal/m<sup>2</sup>으로 나타나 태양에너지 부존량은 100억 TOE에 해당되며<그림 1-7, 1-8>, 이로써 우리나라에서도 고효율 태양광 집광시스템의 활용이 가능하다는 점이 입증되어 일사량의 70% 이상을 태양열·전기로 변환시킬 수 있는 고 집광기술의 활성화가 기대됨.



<그림 1-7> 우리나라 전국 연평균 청명일 법선면 직달일사량 자원분포도(kcal/m².day).



<그림 1-8> 우리나라 지역별 연평균 1일 전일사량(kcal/m²).

- 대체에너지원 중에서 비교적 적은 연구개발 비용과 짧은 연구개발 기간에 실용화가 가능한 분야 중의 하나가 바로 태양에너지 이용 분야임.
- 그 동안 태양열 이용보급분야의 실용화는 평판형 및 진공관형 태양열집열기를 채용한 가정용 태양열 온수기를 중심으로 상당히 보급이 활발하게 진행되어 왔고, 태양광 발전용으로 실리콘 태양전지(PV) 모듈 설비를 이용해 전기에너지를 생산하는 시스템이 주를 이루고 있으나, 경제 산업적 측면에서 이러한 두 시스템을 하나로 통합하여 태양열 및 전기를 한 시스템에서 동시에 생산하는 복합형 연구개발이 필요함.
- 최근 태양열 집열 및 태양광 발전 통합 시스템 개발은 효율 및 경제 산업적 측면에서 중요성이 매우 크며, 농업용 건조장치 뿐만 아니라 전 산업 분야에 이용함으로써 에너지 비용을 줄이고, 대규모 수요 창출에 의한 산업화로 고용 증대효과 및 유류의 수입대체효과를 극대화시킬 수 있음.
- 기후변화협약 이후 예상되는 청정 에너지기술에 대한 선진국의 기술독점에 대비하여 자체개발을 통해 낙후된 국내의 태양에너지 산업의 선진화가 필요한 실정임.
- 특히 태양열 집열 및 태양광 발전이 통합된 복합형 하이브리드 시스템은 4계절 사용이 가능하므로 경제성이 매우 높고 산업화가 가능하여 고용창출효과가 크게 기대됨.

#### 다. 사회·문화적 측면

- 지구 온난화의 주범으로 알려진 온실가스 배출량 감축방안 모색 및 국가별 이산화탄소 배출권거래를 거래하자는 배출권 거래제도(Emissions Trading) 쟁점이 부각되고 있는 세계적 추세에 따라 대체에너지에 대한 인식이 새롭게 부각되고 있을 뿐만 아니라 세계 무역시장 또한 큰 변화가 예상되므로 정부의 적극적인 지원에 부응하여 새로운 대체에너지 시스템의 실용화를 전제로 연구집단의 적극적 기술개발이 필요함.
- 국내 수요에너지의 98%를 수입에 의존함에 따라 수입대체 효과가 크다고 할 수 있는 대체에너지의 실용화를 통하여 현 국내 상황에서 강력히 요구되는 농업의 국가 경쟁력제고의 한 방법으로 태양열 집열 및 태양광 발전 복합시스템 개발과 같은 기술 개발은 절대적으로 필요한 연구임.
- 유가상승과 국제적 환경규제가 본격화되면 국제적인 기술보호 장벽을 고려할 때 21세기 전반에 예상되는 급격한 에너지 환경변화에 자체 기술력을 갖고 대응할 수 있느냐 하는 것은 국가적으로 매우 중요한 변수가 될 것임 으로 이를 위해 앞으로 우리가 해야 할 일은 전 국민적으로 대체에너지에 대한 인식을 높이고 적극적인 기술개발 및 보급정책에 호응하도록 하는 사회분위기를 진작하는 일일 것임.
- 이를 대체에너지 이용 기술개발 측면에서 지원하기 위해서는 태양열 집열 및 태양광 발전 하이브리드 복합시스템을 건조장치에 이용하는 기술개발과 같은 범 산업적으로 이용할 수 있는 기술을 적극 개발하여 실용화 시켜야 함.
- 앞으로 예상되는 에너지 시스템 환경변화를 객관적으로 인지하고 태양에너지와 같은 대체에너지가 차세대의 에너지 공급을 담당 할 수 있어야만 에너지 문제로 재정적 곤경을 겪고 있는 농업뿐 아니라 전 산업을 살릴 수 있는 길이 될 것이며, 대체에너지를 단지 석유가격의 앙등을 막는 백스톱 기술이라는 소극적 시각으로만 인식할 것이 아니라, 다음 세대의 에너지믹스의 주역이 될 것을 기대하면서 태양광 집광 및 태양광 발전 하이브리드 복합 농산물 건조시스템과 같은 융합형 대체에너지 이용 기술개발에 우리의 노력을 하나로 모아야 할 것임.

#### 4. 연구개발의 SWOT 분석

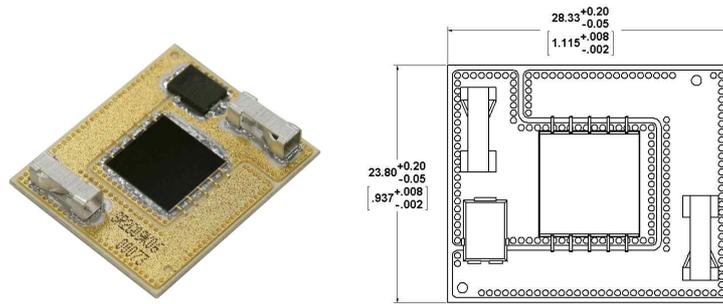
(강점)	(약점)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 유류 사용량 절감으로 환경오염원 감소</li> <li>○ 국가적 에너지난 해소에 다소나마 기여</li> <li>○ 특허획득 및 산업화 가능</li> <li>○ 농업뿐 아니라 전 산업용으로 확대 이용 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 개발될 시스템의 보급 확대를 위해 국가의 정책적 지원이 필요</li> <li>○ 태양에너지 이용 분야에 대한 연구지원 확대가 필요</li> <li>○ 태양에너지 이용시스템의 농업분야 이용기술 부족</li> </ul>
(위기)	(기회)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국내외 연구자료 부족</li> <li>○ 태양광-열 복합시스템에 대한 인식부족</li> <li>○ 기술개발 지연에 따른 관련 제품 수입의 가능성이 급증</li> <li>○ 기술사용료 지불 비용 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 온실가스 배출량 감축방안 모색 및 국가별 이산화탄소 방출쿼터를 거래하자는 배출권 거래제도 쟁점이 부각</li> <li>○ 환경오염 주범인 화석연료 대체를 위한 친환경적 태양 에너지와 같은 신재생에너지에 대한 인식이 부각</li> <li>○ 저탄소 녹색성장을 위해 국가적 차원의 무공해 청정 대체에너지 이용기술 개발이 절실함</li> <li>○ 2030년까지 11%의 국가적 신재생에너지 보급률 목표 달성에 기여</li> </ul>

#### 5. 기술개발의 혁신성

- 기존의 태양열 및 태양광 발전 시스템은 각기 하나의 독립된 시스템으로 설비되어 운영되고 있으나, 본 연구는 이러한 태양열 및 태양광 발전 시스템을 통합하여 하나의 시스템으로 구성하여 건조장치에 이용함으로써 경제성 및 효율성을 극대화할 수 있는 태양광-열 복합 신기술임.
- 특히 본 연구에서는 가시광선 및 적외선 영역에서 태양광 발전효율이 탁월한(표 1-1) 크기 1cm × 1cm의 집광형태양전지(CPV셀: 그림 1-9)를 원추형 집광기 내의 흡수관 표면에 부착하여 복합시스템을 구성함으로써 고효율의 태양복사열 회수와 동시에 태양광 발전효율의 극대화가 가능한 새로운 개념의 원추형 태양광-열 복합 집광 시스템임.

<표 1-1> Typical current-voltage parameters of CPV at 50mW/cm<sup>2</sup>, 25°C

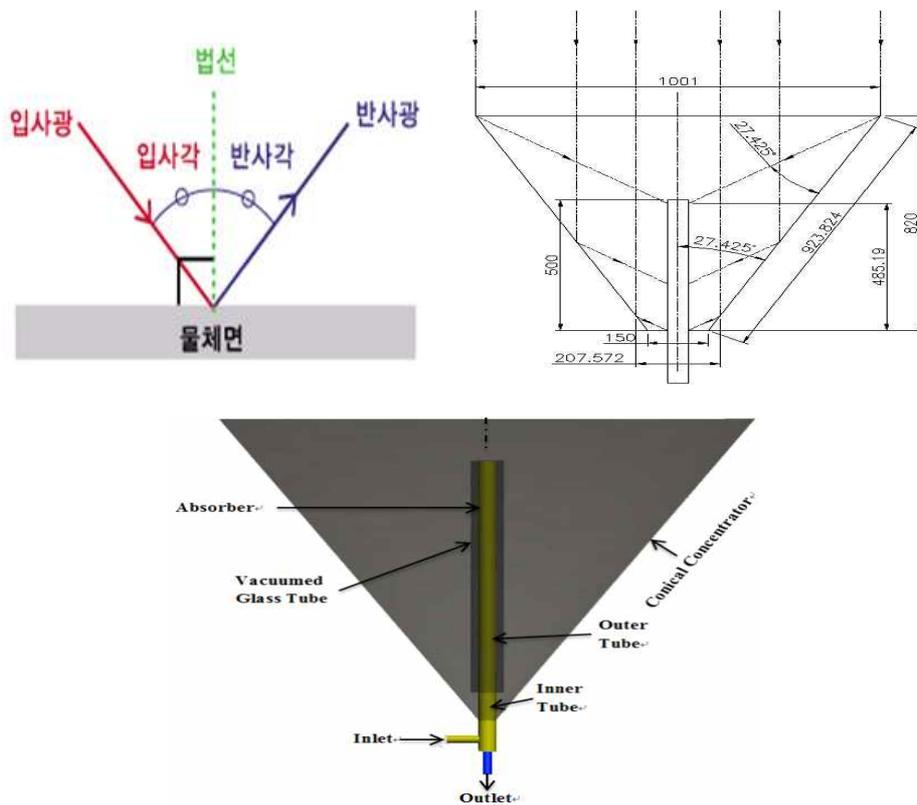
Parameter	Value at 25°C 50mW/cm <sup>2</sup>
Efficiency (%)	38.5
Isc (Amps)	7.06
Imp (Amps)	6.92
Voc (Volts)	3.15
Vmp (Volts)	2.75



<그림 1-9> CPV셀 및 어셈블리 구조.

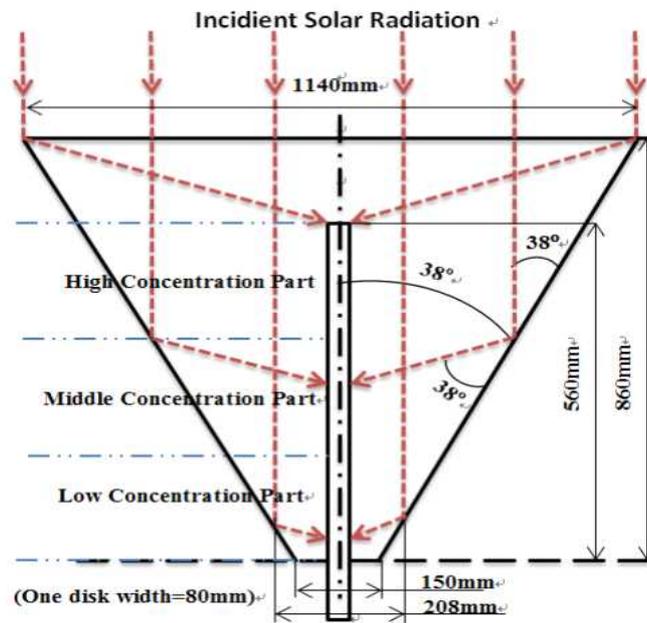
○ 기존의 태양광 집광방법은 포물형 원통 집광기(PTC) 또는 접시형 집광기 등과 같이 태양광을 반사시켜 점 또는 선으로 집광하는 방법이 있으나, 이는 제작비용이 크게 소요되고 효율이 낮은 단점이 있음.

○ 따라서, 본 연구에서는 제작이 용이한 포물형과 접시형 집광기의 혼합형 신기술인 원추형 집광기를 개발하고, 흡수기의 고 집광부 표면에 CPV셀을 설비하여, 고 효율의 태양광 발전과 동시에 흡수기 내로 열매체를 순환시켜 태양 복사열을 회수하여 건조장치에 열원으로 이용하는 지금까지 개발된 바 없는 신 개념의 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 개발하여<그림 1-10>, 농산물 건조장치에 이용하고자함.



<그림 1-10> 원추형 집광기의 집광 원리 및 개략도.

○ 지금까지 개발되어 실용화되고 있지 않는 포물원통형과 접시형 집광기의 복합개념인 집광효율을 극대화한 원추형 집광기를 집광장치로 개발 및 활용하고, 흡수기 표면의 고 집광 부(high concentration part)에 CPV셀을 부착 및 흡수기 내에 열매체를 순환하게 하여 CPV셀을 냉각시켜 고 효율의 태양광 발전을 가능하게하며, 이와 동시에 흡수기 표면에 집광된 태양복사열을 회수하는 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발<그림 1-11>.



<그림 1-11> 원추형 집광기의 흡수기 집광 영역(고 집광부: CPV셀 부착 부분, 중 집광부, 저 집광부) 구분.

○ 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 구성요소는 CPV셀, 축전지, 직류를 교류로 변환하기 위한 인버터, 열전달 기구인 이중열교환기 형태의 흡수기를 설비한 원추형 집광장치와 열전달매체, 축열장치 및 보조가열기, 태양추적장치 등으로 구성되는 독창성이 큰 신기술인 태양광-열 동시생산 복합 집광시스템임.

○ 태양추적장치는 태양센서 및 linear actuator와 slew driver로 구성하여 고도와 방위의 2축 정밀 추적이 가능하도록 설비함.

## 제 2 절 연구개발의 범위

### 1. 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 개발

- 가. 원추형 반사판 및 흡수기 설계/제작
- 나. 원추형 집광기 및 태양추적장치 일체화 지지대 설계 및 제작
- 다. 원추형 집광기의 집열성능 실험설비 구축 및 성능분석
- 라. 집광된 태양복사열에 의해 가열된 열매체 축열을 위한 축열조 설비 및 성능분석
- 마. 고 집광부의 흡수기 표면에 CPV셀 장착 기술개발
- 바. 단일 및 다 모듈 태양추적 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템 설계/설비
- 사. 열유동 해석(CFD) 및 열화상 분석을 통한 흡수기 내 열매체 온도와 흡수기 표면 CPV셀 온도분포 분석
- 아. 단일 및 다 모듈의 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 최대 열 회수를 위한 열매체의 최적 순환유량 분석
- 자. 단일 및 다 모듈의 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 집열 및 발전효율 분석

### 2. 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 건조장치 개발

- 가. 건조실 및 열교환기 설계/제작
- 나. 건조온도 제어를 위한 유량제어장치 설비
- 다. 건조온도 제어부의 알고리즘 개발 및 태양광 발전 자체 생산전력 이용시스템 구축
- 라. 다 모듈 원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템과 통합된 에너지 자립형 건조장치 설계/제작

### 3. 건조장치 운전 성능 및 경제성 분석

- 가. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템과 통합된 건조장치 운전 성능분석
- 나. 농산물(호박, 당근) 건조 특성분석
- 다. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 건조장치의 경제성 분석

### 제 3 절 연구성과 목표 대비 실적

구분 (연도)	세부연구목표	연구결과	달성도 (%)
1차 년도 (2015)	○ 원추형 반사관 설계 및 제작	- 반사율 96.56%를 갖는 알루미늄 반사관을 이용한 45도 각의 원추형 반사관 및 AI 프로파일용 반사관 지지대 설계 및 제작	100
	○ 집광기의 흡수기 개발	- 동관을 이용한 이중열교환기 형태의 흡수관 설계 및 제작 - 원추형 반사관 및 흡수기 일체화를 위한 고정장치 설계/제작	
	○ 태양추적장치 및 축열조 설비	- Linear Actuator과 Slew Driver를 이용한 고도 및 방위 2축 정밀 태양추적장치 설비/열교환기를 내재한 축열조 설비	
	○ CPV셀 Array 설계 및 제작	- 고집광부에 CPV셀 부착 및 셀 간 직렬배선 - CPV 과열방지 및 집광을 향상을 위한 보조집광기 설계/설비 - 원추형 반사관, CPV셀, 흡수기를 일체화하여 모듈화 설비	
	○ 단일 및 다 모듈 CPV/T 복합 집광시스템 설비	- CPV셀 부착 원추형 집광기 1개 및 4개로 구성된 단일 및 다 모듈 집광시스템 설계/설비 - 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템용 태양추적장치 설비	
	○ 원추형 CPV/T 복합 집광시스템 성능 분석	- CFD분석을 통한 흡수관 내 열매체 온도 분석(20~21℃) - 열화상분석에 의한 흡수관 표면 CPV셀 온도 분석: 45℃이하 - 최적 열매체 유량 분석: 4L/min - 단일 모듈 원추형 복합시스템 합산효율: 78%(집열율:57%, 발전효율:21%) - 다 모듈 원추형 복합시스템 합산 효율: 76%(집열효율:56%, 발전효율: 20%)	
2차 년도 (2016)	○ 건조실 설계 및 제작	- 건조실 크기 및 재료 선정, 공기 순환유로 결정, 건조실 구조 설계 및 제작 - 건조온도 제어를 위한 유량제장치 및 건조온도 제어장치 설비	100
	○ 태양광 발전 자체 생산전력 이용시스템 구축	- 충방전 제어장치, 발전전기 저장용 축전지 설비 - 교류변환 인버터 및 시스템 제어장치 설비 - 발전 및 소비 전력 계측을 위한 전력량계 설비 - 태양추적장치, 보조 열원부, 펌프 등 자체 생산전력 이용 시스템 설비	
	○ 다 모듈 원추형 복합 집광시스템과 통합된 에너지 자립형 건조장치 설계/제작	- 다 모듈 원추형 집광기, 태양추적장치, 축열조, 열교환기, 건조실 일체형 건조장치 설계/제작 - 축열조 및 건조실 유로설계/설비 - 순환펌프, 밸브, 유량계 등으로 구성된 유체순환 배관설비 - 온수 순환 유동관과 일체화된 열교환기 설계 및 설비	
	○ 건조장치 운전성능 및 건조 특성 분석	- 건조기 내 온습도 측정을 위한 데이터획득장치(DAS) 구성 - 건조기 내 설정 건조온도 유지성능 분석 - 농산물 건조특성 분석	
	○ 복합 집광시스템을 이용한 건조장치 경제성 분석	- 건조장치 에너지 경제성분석 - 시스템 설비 수익성과 투자회수 기간 분석	
최종 평가	○ 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발	- 단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 설계/제작 및 성능평가	100
	○ 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템을 이용한 건조장치 개발	- 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치 설계/제작 및 운전 성능 분석	
	○ 건조장치 건조특성 및 경제성 분석	- 농산물 건조특성 분석 및 건조장치 경제성 분석	

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 기술개발 현황

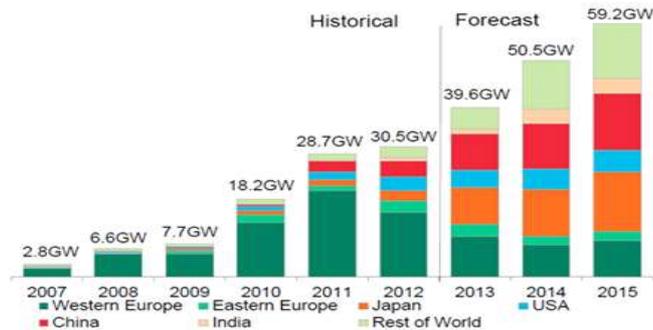
- 우리나라는 1980년대의 두 차례의 에너지 파동을 거치면서 지난 20여년동안 태양 에너지의 활용에 상당한 관심을 가지고 관련 기술의 개발 및 이의 보급에 정부가 주도적인 역할을 수행해 왔음.
- 태양열 이용기술로 열매체를 이용한 평판형 집열기를 사용한 가정용 온수 시스템이 이용되고 있으며, 또한 진공관형 태양열집열기를 사용한 시스템의 경우 외국에서 전량 수입하여 시공하는 수준임.
- 현 정부의 지원 하에 실용화된 고 효율의 태양에너지 이용기술은 전무한 상태로, 한 시스템에서 동시에 생산된 열 및 전기를 농산물 건조에 이용하는 기술은 매우 효율적이고 경제성이 큼.
- 국내외적으로 태양광 집열과 CPV셀 발전이 통합된 태양광-열 복합 집광시스템이 개발되어 산업화 된 바 없음.
- 국내의 실리콘 태양전지 기술은 아직 발전단계로 효율이 12%에서 18%로 향상되는 등 태양광 산업 강국으로의 도약을 준비 중에 있으나, 개발된 기술이 상업화되어 실증연구가 이루어지는 수준으로 기술수준은 선진국 대비 71%, 모듈가격은 80% 수준임.
- 비실리콘계 태양전지 개발을 위해 국내에서 CIGS 박막 염료감응 유기태양전지에 기술투자 중이나 국내 CIGS 박막셀 기술은 세계수준의 94% 수준임.
- 그러나 국내에서 셀의 면적을 최소화 하면서 효율을 극대화하는 고효율의 고 집광 다중접합 태양전지인 집광형 태양전지(CPV) 개발을 위한 연구는 일부 정부출연연구소를 중심으로 진행되고 있으나, 아직 가시적 성과가 보고되고 있지 않으며, 반도체 제조 기술을 축적한 대기업의 기술투자가 이루어지면 그 개발이 가속될 가능성이 있음.
- CPV셀 자체 기술개발 못지않게 CPV 제품을 이용하여 상업화하는 기술도 중요하지만 이에 관한 기술 확보도 국내에서는 아직 초보 수준임.
- 국내에서 실리콘 태양전지(PV셀) 모듈을 이용하는 하이브리드 평판집열판 기술(PVT)이 연구되고는 있으나, 낮은 효율로 인해 경제성이 매우 부족하여 실용화는 한계가 있는 것으로 나타나고 있음.
- 현재까지 국내외에서 태양열 및 태양광 발전 복합시스템이 개발되어 농산업분야에 적용된 사례는 없음.

## 제 2 절 국외 기술개발 현황

- 기후변화협약 후 선진국들의 경우 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위해 대체에너지 연구개발에 대한 정부의 지원을 증가시키는 추세에 있으며 이에 따라 여러 대체 에너지자원 중에서 높은 점유율을 차지하는 태양에너지 이용이 현격히 증가하고 있음.
- 환경오염의 주범 중 하나인 화석 연료 사용은 지구 온난화를 일으키고 에너지 분쟁을 불러오고 있어, 지속가능한 미래 에너지의 개발이 시급한 상황으로, 특히 2011년 일본 후쿠시마 원전사고 이후 전 세계적으로 기존 원자력 발전 중심의 에너지 정책을 재검토하고 신재생에너지의 개발을 가속화하고 있음.
- 태양열 이용기술 개발은 저온분야의 경우 첨단소재 개발을 통한 고효율 및 저가화에 집중하고 있으며, 최근 중고온 분야의 태양열발전, 태양열 화학시스템의 응용개발에 많은 연구가 이루어지고 있음.
- 선진국에서는 국가별 특성에 맞는 태양열이용기술을 중점 개발하여 보급하고 있으며(미국 : 태양열 발전, 일본·호주 : 온수기, 유럽 : 대규모 집단난방 및 급탕시스템 등), 저온 태양열 시스템 보급 활성화를 위한 인증시험 및 평가, 신뢰성 향상 등에 지속적인 연구를 추진하고 있음.
- 미국의 태양열집열기 사용지역은 높은 일사량을 갖는 캘리포니아, 플로리다에 집중되어 있으며 지역적 특성 및 생활문화에 따라 저온용 집열기를 사용하여 Pool Heating, Hot Water 및 Space Heating에 많이 적용되어 왔으나 Process Heating에 적용하기 위한 연구개발이 정부의 적극적 지원 하에 여러 각도로 이루어지고 있음.
- 최근에 태양열 분야에서 급부상하고 있는 나라는 바로 중국이며, 이 중에서 Sunda 회사의 주요 생산품은 평판형집열기와 진공관형 집열기 및 태양열온수기, heat pipe 전기히터 등이 있으며, 이 회사는 독일의 Daimler-Benz Aerospace사와 합작회사로 1996년 6월에 설립되어 독일과의 3년간 국제 공동연구를 바탕으로 진공관형 집열기를 연간 50만대 생산하는 공장을 완성하여 생산 및 판매중임.
- 유럽의 기술개발 및 보급의 핵심은 태양열 난방 및 온수기, 자연형 태양열 등이고, 수출을 목적으로 한 태양열 발전 등의 개발이 지속적으로 추진 중임(JOULE 프로그램 내, THERMIE 프로그램).
- 태양열 발전의 경우 스페인, 이탈리아, 프랑스에 0.5~2.5 MW급이 설치된바 있으며, 60 kW 용량의 태양로(Solar Furnace)가 운전 중에 있고 Dish(44 m<sup>2</sup>)형 엔진 개발을 완료함.
- 이와 같이 세계가 대체에너지 개발을 통하여 자국의 신재생에너지 기술력을 홍보하는 한편 개발된 기술을 바탕으로 제품의 저가화 등으로 수출을 도모하는데 많은 노력을 경주하고 있는 실정임.

○ 세계 태양광발전 산업시장은 일본, 독일, 미국의 순서로 하여, 이 3개국이 압도적인 우위를 점유하고 있으며, 국가적인 정책 및 연구개발의 뒷받침으로 기술발전은 물론 보급도 활발한 증가추세를 보이고 있음.

○ 2013년 세계 태양광 발전 설치량은 38.7GW로 전년대비 26% 성장하였으며, 유럽 중심의 태양광 발전 수요가 아시아를 비롯한 중남미 국가 등으로 확산되고 있어 태양광 발전이 긍정적인 측면에서 2016년에는 59.2GW까지 확대될 것으로 추정됨.



<그림 2-1> 세계 태양광 시장 현황 및 전망 (출처: New Energy Finance)

○ 세계 태양광 시장은 2013년부터 2030년까지 연 16% 이상 성장하여 1.5TW의 태양광 발전이 신규로 설치될 전망이며, 기존의 대형 발전보다는 소규모 분산전원 및 가정용 수요를 중심으로 성장할 것으로 전망됨.

○ 최근 국외의 태양전지 기술의 진보추세는 발전효율이 10~20% 범위인 결정형 실리콘계에서 2세대 박막형전지로 진보함과 함께, 발전효율이 30~45%로 증가된 다중접합형 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지(Concentrating Photovoltaic Cell: CPV)가 개발되면서 미래 에너지원으로 자리를 잡을 것으로 예상됨.

○ 미국, 독일, 이스라엘 등을 중심으로 CPV 분야에서 신기술개발 경쟁이 치열하며 기초, 원천 및 산업 이용 기술개발 경쟁이 가속화 되고 있으나, 이들 기술 선진국에서도 CPV의 보급은 비교적 최근에 시작되고 있음.

○ 최근 독일의 아주르 스페이스 파워(www.azurspace.com)가 500 배의 집광비를 이용해 43.3% 효율을 달성한 새로운 멀티접합 태양전지를 개발했으며, 이전 제품에 비해 가장 높은 효율성을 가진 것으로 태양전지가 MOVPE(금속 유기 증기상 에피택시)를 사용해 효율이 수직 상승하고 있다고 밝히고 있음.

○ 따라서 전통적 태양광 발전산업은 사용 환경과 필요에 따라 CPV를 도입하는 체제로 일부 다시 재편성 될 가능성이 높으며, 실리콘계 태양전지(PV)와 비실리콘계 다중접합 태양전지간의 기술 및 가격경쟁 또한 가속화될 전망이다.

- 일본은 지난 New Sunshine Project의 평가를 기본으로 신에너지개발기구(NEDO), 경제산업성(METI), 태양광연구회(JPEA) 등이 공동으로 2030년까지의 장기적인 로드맵을 작성하였고, 그에 따른 설치가격 및 전력가격을 예측하여 2020년 약 30GW, 2030년 약 80GW 이상의 누적 태양전지 용량을 달성한다는 목표를 설정하고 있음.
- 미국은 DOE 주도하에 NREL과 Sandia National Laboratory가 태양광산업에 주축을 이루고 있으며, 2030년까지 전력부하의 10%를 태양광으로 감당할 계획임.
- 독일을 포함한 유럽공동체(EU)는 2020년까지 약 15GW의 태양광 발전시스템을 설치할 계획을 가지고 있음.
- 네덜란드의 TNO(응용과학연구기관)는 HES(교육기관)와 공동으로 유리덮개 없는 PVT 집열기+히트펌프에 관한 연구를 시작하였고, 1994 ~1998년간 EUT(Eindhoven University of Technology)에서 PVT 모듈 개발이 수행된바 있음.
- 덴마크에서는 2000년에 태양열집열기 제작사인 Batec사와 PV 제작사인 Racell사 및 Esbensen Consulting사와 공동으로 PVT 집열기의 연구를 수행하였음.
- 2000 ~ 2005년간에는 미국에서 PV:BONUS(Building Opportunities in the US for Photovoltaics) 프로그램하에 Power Light 및 PVT 프로젝트를 수행하였음.
- 그러나 고효율의 원추형 집광기 및 집광형 태양전지(CPV)를 결합한 태양광-열 하이브리드 복합시스템을 개발하여 농산물 건조장치에 이용하는 연구는 국외에서도 시도된 바 없음.

### 제 3 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

온실가스 배출량 감축방안 모색 및 국가별 이산화탄소 방출쿼터를 거래하자는 배출권 거래제도(Emissions Trading) 쟁점이 부각되고 있는 세계적인 추세에 따라 대체에너지에 대한 인식이 새롭게 부각되고 있는 현실로 볼 때 청정 에너지기술에 대한 선진국의 기술독점에 대비하여 대체에너지 기술의 자체개발을 통해 낙후된 국내의 태양에너지 산업의 선진화가 필요한 실정이다. 현재 정부에서 보조금을 지급하는 방법으로 실리콘 태양전지 기반의 태양광 발전 시스템 보급을 확대하고 있으나 변환 효율이 낮아 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 매우 높아 재생에너지로서의 효용성이 낮아 미래 에너지로서의 입지를 확보하지 못하고 있으며, 낮은 제조 단가에도 불구하고 낮은 변환 효율과 짧은 수명이 산업화에 걸림돌이 되고 있다. 이러한 문제로 인하여 최근에는 실리콘 태양전지를 비롯한 저가의 1세대 실리콘 태양전지보다는 효율이 높은 2세대 태양전지의 발전 단가를 낮추어 지상용 전력으로 사용하기 위한 연구가 증가하고 있다.

기존의 태양열 집광기 또는 태양광 발전 시스템은 각각 개별 장치로 운영됨으로 태양열과 전기를 동시에 이용할 시에는 개별적인 설치비용이 필요하여, 소요비용이 크게 된다. 그러나 한 시스템으로 고온의 열과 전기를 동시에 생산할 수 있는 저비용의 고효율 원추형 태양광-열 복합시스템을 개발하여 농산물 건조 장치의 에너지원으로 이용함으로써 농가의 에너지 비용을 줄이고, 농가 소득을 향상시킬 수 있으며 유류의 수입대체효과를 극대화시킬 수 있다. 태양광과 태양열을 동시에 활용하여 농산물 건조장치에 이용하는 기술개발과 같은 연구는 국내외적으로 큰 관심분야가 될 것이며, 본 연구에서 태양광 발전 및 태양열 집열이 매우 우수한 고효율의 원추형 태양광-열 복합시스템을 개발하여 태양에너지를 유효하게 건조장치에 이용함으로써 경제성뿐만 아니라 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 시스템으로 그 활용성이 크게 기대된다.

또한 본 연구에서 개발된 고효율의 원추형 태양광-열 복합시스템의 구성요소는 태양광을 효과적으로 집광하는 원추형 집광기, 발전 효율이 큰 고 집광용 태양전지(CPV셀), 태양광의 최대 집광을 위한 태양추적장치, 태양열을 저장하는 축열조, 보조열원부 및 제어부 등으로 구성되어 있다. 태양복사열은 축열조의 열매체에 저장되고, 축열된 열매체는 건조실 내의 열교환기를 통해 건조실 내의 공기를 가열하며, 유량 제어부를 통해 건조온도를 적절히 조절할 수 있다. 또한 원추형 태양광-열 복합시스템에서 생산된 전기에너지는 태양추적장치, 펌프, 보조열원부 등의 에너지 공급원으로 이용되는 고효율의 에너지 독립형 원추형 태양광-열 복합 집광장치를 이용한 농산물 건조장치는 기술적인 측면에서 신기술인증 획득이 가능하여 저비용의 농가 보급이 크게 기대된다.

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1절 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발

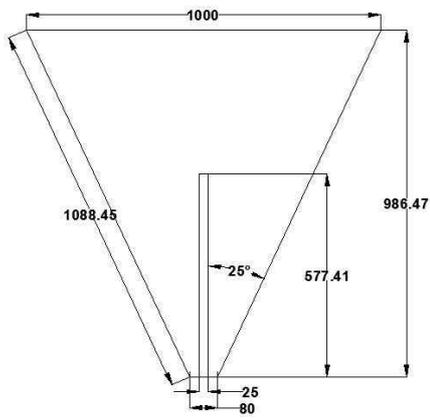
#### 1. 원추형 집광기 설계

##### 가. 원추각 선정

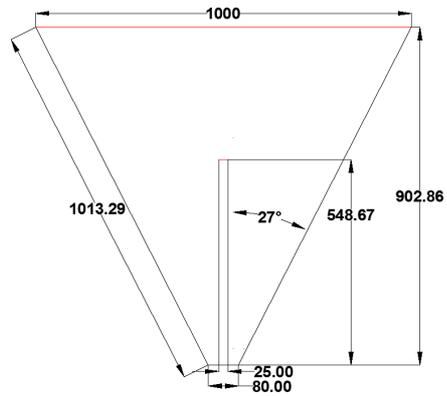
원추형집광기의 원추각은 원추의 각도에 따라 집열효율과 열손실에 막대한 영향을 미침과 동시에 흡수기 제작 및 설치 면적에도 관여하기 때문에 원추형 집광기의 집열효율을 극대화 할 수 있는 최적의 원추각을 분석 및 선정하였다(Table 1-1과 Figure 1-1). 분석 결과 원추각이 45° 일 때 평균 집광비가 17.07로 가장 크게 나타났고, 외부로의 열 손실을 최소화 할 수 있는 흡수기의 길이가 460mm인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 원추형 집광기의 원추각을 45°로 설계 및 제작하는 것이 열손실을 최소화하고 최대의 집광효율을 갖는 것으로 분석되었다.

Table 1-1 Values of collector with cone angle

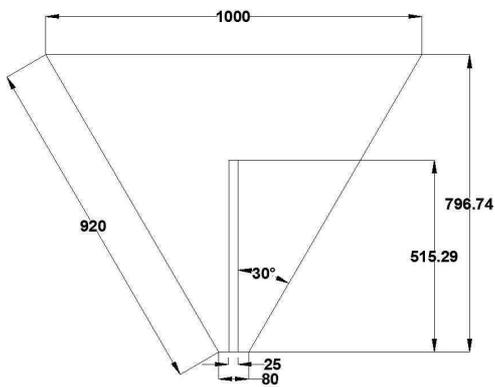
Cone angle	Absorber length(mm)	Collector high(mm)	Surface area of absorber(mm <sup>2</sup> )	Solar concentration ratio(%)	Loss high of absorber (mm)
25°	577.41	986.47	57,741	13.60	23.08
27°	548.67	902.86	54,867	14.31	19.98
30°	515.29	796.74	51,529	15.24	16.27
35°	479.51	656.95	47,951	16.38	10.01
45°	460	460	46,000	17.07	0.0
50°	471.95	385.99	47,195	16.64	4.86
60°	547.04	265.58	54,704	14.35	15.88
70°	748.41	167.43	74,841	10.49	32.85



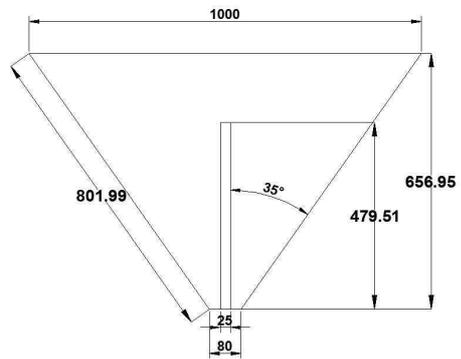
(a) 25° cone angle



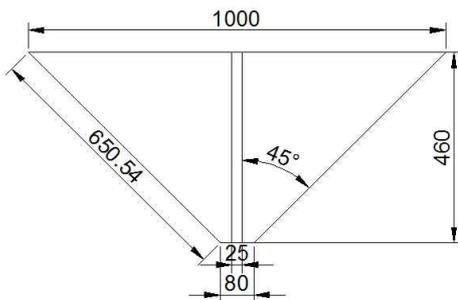
(b) 27° cone angle



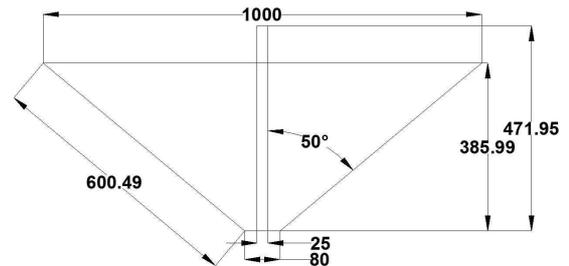
(c) 30° cone angle



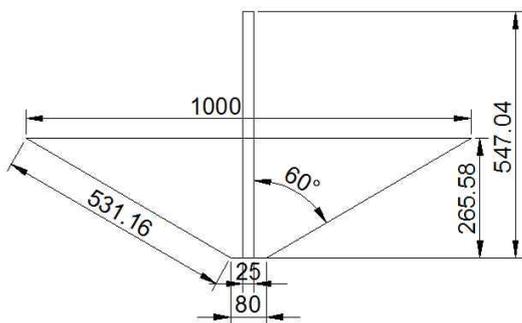
(d) 35° cone angle



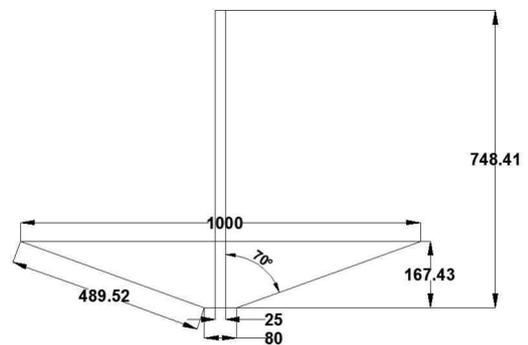
(e) 45° cone angle



(f) 50° cone angle



(g) 60° cone angle



(h) 70° cone angle

Figure 1-1. Dimension of conical concentrator according to cone angle.

#### 나. 집광 범위 및 열 손실 분석

원추형 반사관에 의해 태양복사에너지를 흡수기로 집광시킬 수 있는 원추형 집광기는 태양광의 입사 및 반사법칙에 따라 다른 각도로 반사되어진다. 즉 45° 이하(예 27°)의 원추각을 갖는 원추형 반사관의 상부와 중간 및 하부 중의 윗부분에서 반사관을 통해 반사된 태양복사에너지는 흡수기에 전달되지만, 반사관 하부의 밑 부분을 통해 흡수기로 반사된 태양복사에너지는 흡수기에 도달하지 못하고 하단의 직경 80mm 개구를 통하여 손실되므로 동일한 집광 면적 하에서 45°의 원추각을 갖는 원추형 집광기에 비해 흡수되는 태양복사에너지양이 적어진다(Figure 1-2). 또한 45° 이하의 원추각을 갖는 원추형 집광기의 흡수기는 45°의 원추각을 갖는 원추형 집광기의 흡수기보다 길이가 커야함으로 흡수기의 면적이 증가하여 외부로의 열 손실이 증가하게 된다.

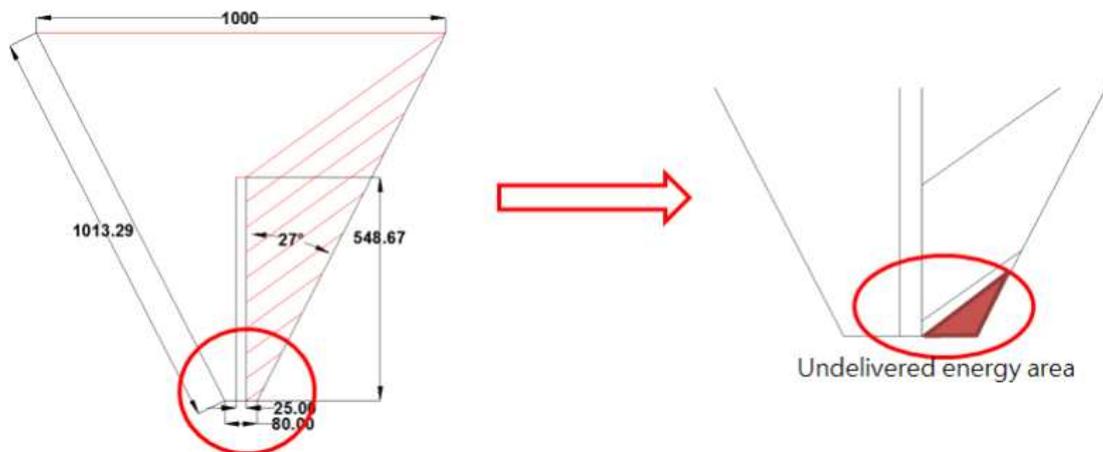


Figure 1-2. Reflection vector of 27° cone angle.

원추각이 45°이상(예 60°)인 원추형 집광기의 반사관을 통해 반사된 태양복사에너지는 45° 이하의 원추형 집광기와는 다르게, 입사된 태양복사에너지를 100% 흡수기에 전달할 수는 있지만, 흡수기의 하단부(Figure 1-3, 적색 표기부분)에는 반사각도에 의하여 태양복사에너지가 전달되지 못한다. 또한 45°이상의 원추각을 갖는 원추형 집광기의 흡수기는 45°의 원추각을 갖는 원추형 집광기의 흡수기보다 커야함으로 흡수기의 면적이 증가하여 외부로의 열 손실이 증가하게 된다(Figure 3-4).

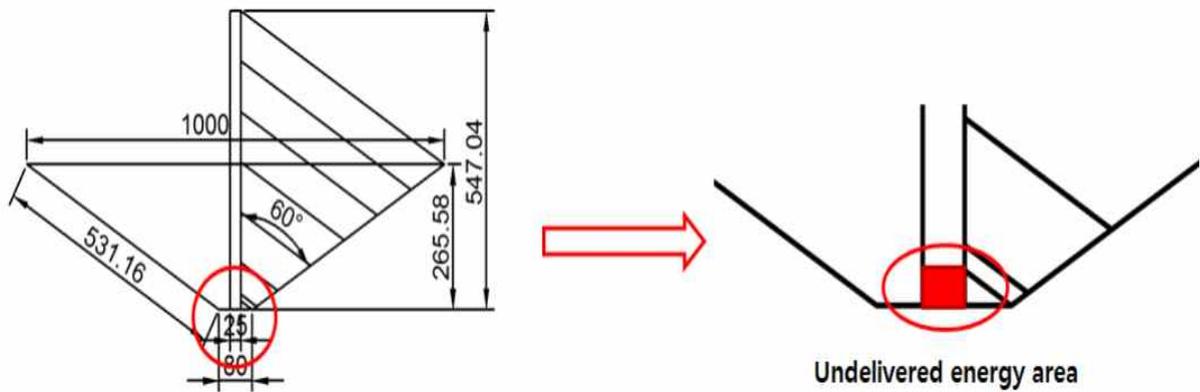


Figure 1-3. Reflection vector of 60° cone angle.

원추각이 45°일 때 집광비가 가장 커 태양광을 최대로 집광할 수 있다. 원추각 45°인 원추형 집광기의 경우는 입사와 반사의 법칙에 의해 반사판을 통해 반사된 태양광선은 90°로 반사되어 흡수기에 전량 전달되기 때문에 원추각이 45°이상 또는 45°이하일 때 보다 입사된 태양복사에너지의 손실이 매우 적고, 외부로의 열 손실이 발생할 수 있는 흡수기의 면적을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 원추형 집광기의 집광비를 계산한 결과 Table 1-1과 같이 25°, 27°, 30°, 35°, 50°, 60°, 70°의 원추각을 갖는 원추형 집광기의 집광비는 각각 13.6, 14.31, 15.24, 16.38, 16.64, 14.34, 10.49 배인 반면 45°의 원추각을 갖는 원추형 집광기는 17.07배의 가장 큰 집광비를 갖는 것으로 분석되어 원추형 집광기의 원추각은 45°일 때 집열효율이 가장 우수한 것으로 분석되었다(Figure 1-4). 기존의 원추형 집광기(본 연구팀 제작)는 45° 이하로 제작되어 태양광 집광정도의 기준인 집광비가 다소 낮아 태양광을 집광하는율이 낮았으나, 원추형 반사판의 원추각이 45°일 때 집광비가 가장 커 태양광을 최대로 집광할 수 있는 것으로 분석되었다.

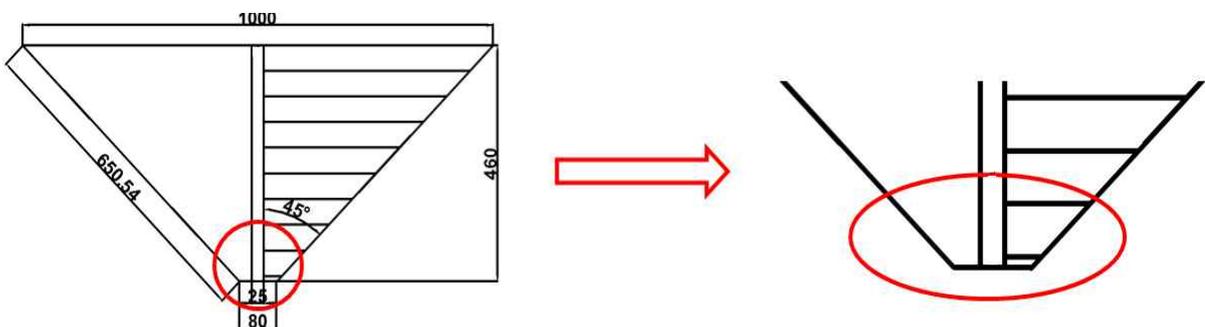


Figure 1-4. Reflection vector of 45° cone angle.

## 2. 원추형 태양광-열 복합 집광기 제작

### 가. 원추각 45°의 원추형 집광기 설계 및 제작

입사 및 반사의 법칙에 의해 입사된 태양복사에너지는 반사판에 의해 45°로 반사되어 원추형 집광기 중앙에 위치한 흡수기에 전량 집광되도록 설계하였다(Figure 1-5). 원추각 45°를 갖는 원추형 집광기의 전개도 및 도면은 CAD프로그램을 이용하여 설계하였다. 설계한 전개도를 바탕으로 가시광선 380nm ~ 770nm에서 평균반사율이 96.56%로서 반사판에서 빛의 손실이 거의 발생하지 않고 반사하게 되는 알루미늄 반사판을 이용하여 Figure 1-6(a, b)의 전개도 및 도면에 따라 절단하여 4개의 원추형 집광기를 제작하였고, 원추형 집광기의 실물은 Figure 2-6(d)와 같다. 알루미늄 반사판의 두께가 0.5mm로 매우 얇은 점을 고려, 무리한 용접시 반사율에 미칠 영향을 우려하여 알루미늄 특수 접합 방법을 사용하였다. 원추형 집광기 개구부(집광면적)의 직경은 1000mm, 높이 460mm, 빗변은 650.54mm이며, 반사판의 제원은 Table 1-2와 같다.

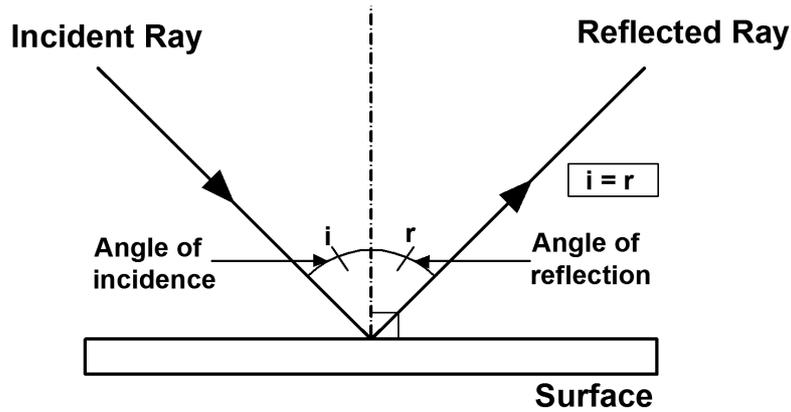
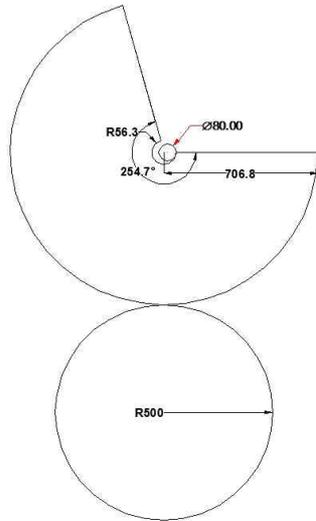
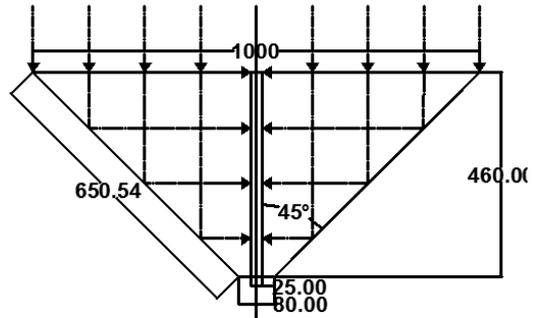


Figure 1-5. Law of reflection.



(a) planar figure



(b) Detail dimensions



(c) Conical collector model



(d) Real Conical collector model

Figure 1-6. Collector of 45° cone angle.

Table 1-2 Specifications of reflector

Reflectivity(%)	slit(nm)	Response(s)	Ordinal	Strength
96.56	2.0	0.5	Reflectance	H18

나. 원추형 집광기 변형 방지 지지대 설비

원추형 집광기 제작을 위해 원형으로 가공 및 제작한 알루미늄 반사판이 시간이 경과함에 따라 변형을 일으킬 수 있는 점을 고려하여, 원추형 집광기 변형 방지 지지대를 10mm×10mm 사각 알루미늄 파이프를 Figure 1-7과 같이 제작하였다. 변형

방지 지지대의 외형은 10mm\*10mm 알루미늄 프로파일을 이용하여 제작한 각기 다른 직경의 원형 형태의 파이프 3개와 흡수기 삽입을 위해 중앙에 30mm\*30mm 사각형을 가공한  $\phi 140$ mm 원판을 최하단부에 순차적으로 위치시키고, 동심을 맞춰 외부에 직선 알루미늄 파이프 이용하여 결합하였다. 원추형 집광기 반사판은 변형 방지 지지대 안쪽에 안착 시켜 변형을 방지 및 지지 할 수 있도록 하였으며, 3개의 원형 형태 파이프의 지름은 각각  $\phi 1020$ mm,  $\phi 860$ mm,  $\phi 520$ mm, 지지대의 높이는 460mm, 원형 형태의 파이프 간의 간격은 상단부터 90mm, 190mm, 180mm이다.

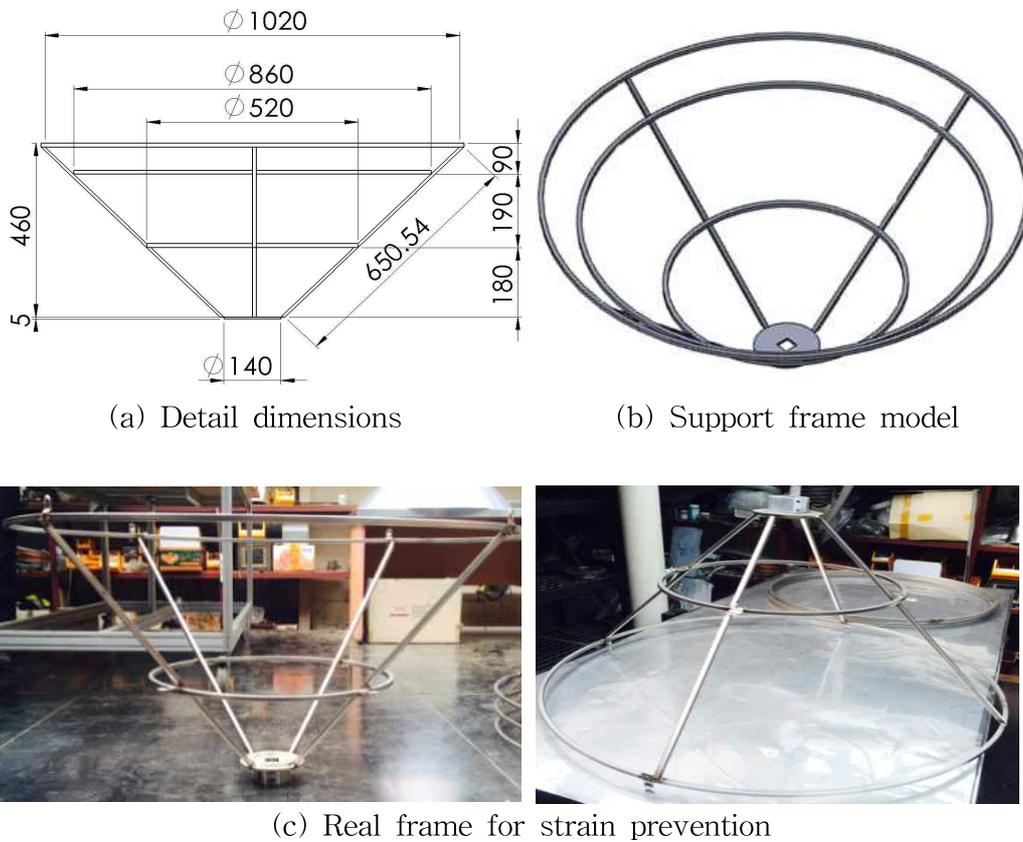


Figure 1-7. Strain prevention support model.

#### 다. 흡수기

원추형 집광시스템의 태양 복사열 흡수를 위한 흡수기 재질은 열전도율이 높으며 부식에 강한 동을 사용하였다. 흡수기는 25mm\*25mm 사각 동관 내부에 16mm 동관을 내재하여 이중열교환기 형태로 제작하였으며, 작동유체는 Inlet을 통하여 사각 동관 내부에 위치한 직경 16mm 원형동관으로 유입된 후, 사각 동관과 직경 16mm 동관 사이를 통과하여 Outlet으로 유출되도록 제작하였다(Figure 1-8(a, b, c)). 흡수

기의 총 길이는 659mm이며, 끝 쪽 460mm 부위가 태양복사열이 집광되는 부분이고, 나머지 부위는 집광기와 결합되고, 열매체 입출구가 설치된 부분이다. 흡수관 제작에 사용된 사각 동관과 원형 동관의 두께는 각각 2mm, 1.02mm이다. 열매체의 유·출입을 위한 Inlet과 Outlet의 직경은 10mm이고, 원추형 집광기의 흡수기 표면은 CPV셀이 부착될 부위를 제외하고 입사된 태양복사에너지를 최대한 흡수할 수 있도록 흑색으로 도색하였으며, 흡수기의 제원은 Table 1-3과 같다.

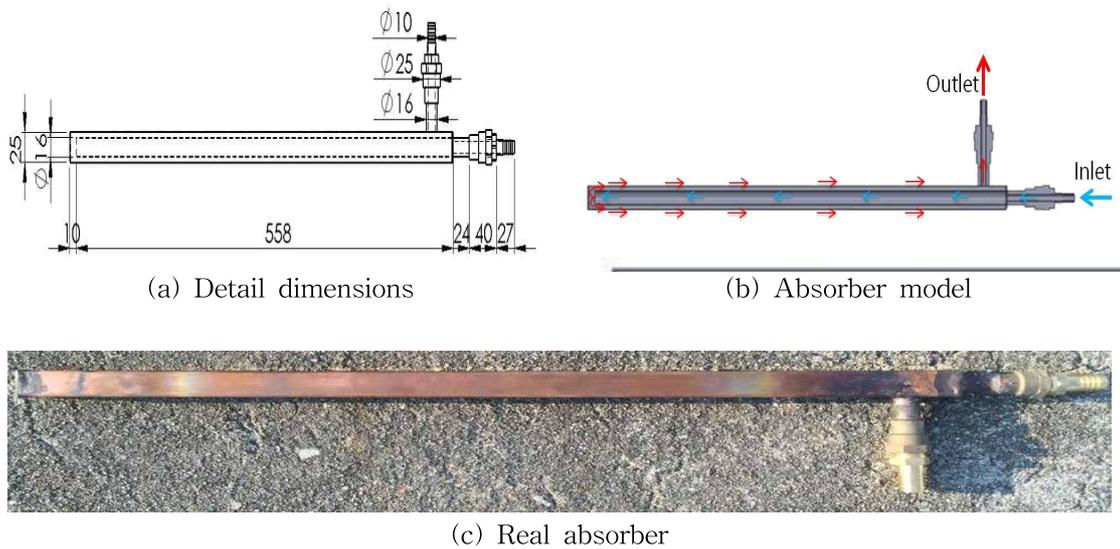


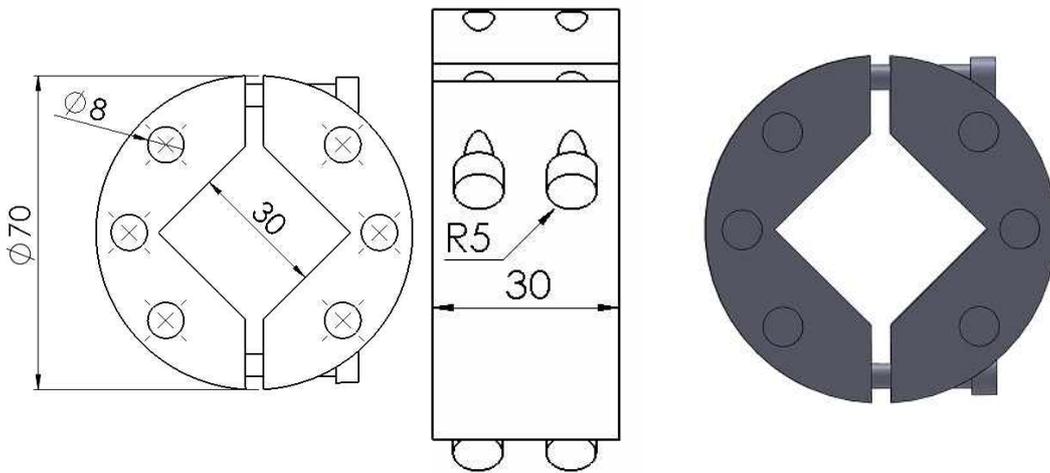
Figure 1-8. Absorber for 45° cone angle.

Table 1-3 Specification of absorber

Classification	Absorber of 45° cone concentrator
Size(mm)	Inner pipe: $\varnothing 16$ External square pipe: 25*25
Thickness(mm)	Inner pipe: 1.02 External square pipe: 2
Total length(mm)	659
Inlet, Outlet diameter(mm)	$\varnothing 10$
Normal pressure( $kg/cm^3$ )	Soft: 74.5 hard: 48.1

라. 흡수기 고정 장치

흡수기를 원추형 반사판에 부착시키기 위하여 Figure 1-9와 같이 알루미늄 재료를 사용하여 고정 장치를 제작하였다. 흡수기 고정 장치의 외형은 반으로 분리된 원통 형태이며, 중앙에는 4각관 흡수기를 삽입할 수 있도록 30mm\*30mm의 사각형을 가공 및 대각선으로 이등분 하였다. 반 원통의 옆면에 가공되어 있는 두 개의 홈에  $\varnothing 10\text{mm}$ 볼트와 너트로 체결하여 내부에 가공된 사각형이 4각 관 형태를 유지하고, 흡수기를 4방면에서 균일하게 지지할 수 있도록 하였다(Figure 3-9). 고정 장치의 지름과 두께는 각각 70mm, 30mm이며, 25mm\*25mm 흡수기와 30mm\*30mm 고정 장치 사이에는 열 손실을 최소화하기 위한 두께 2.5mm 단열재를 위치시킬 수 있도록 공간을 확보하였다. 흡수기 고정 장치의 상면은 원추형 반사판의 하부 끝단과 고정할 수 있도록 각각 3개씩의  $\varnothing 8\text{mm}$  볼트 홈을 가공하였다.



(a) Detail dimensions

(b) Fixture model



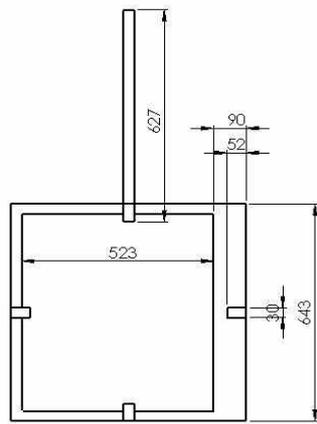
(c) Front view of real fixture

(2) Back view of real fixture

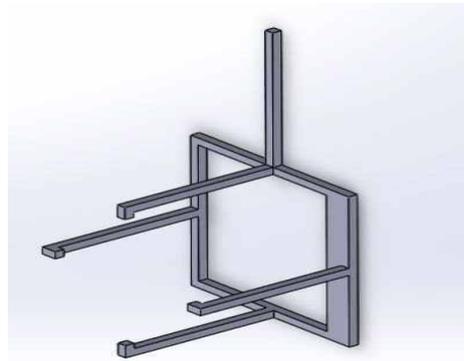
Figure 1-9. Absorber fixture.

마. 원추형 집광기 지지대

집광기의 지지, 고정 및 변형방지를 위한 원추형 집광기 지지대는 30mm×30mm 알루미늄 프로파일을 사용하여 제작하였으며, 45°의 원추형 집광기 지지대는 Figure 1-10과 같다. 집광기의 무게와 모멘트를 감안하여 T자와 ㄱ자 보강대를 사용하여 고정하였으며, 지지대의 상부에 627mm 크기의 프로파일을 태양추적장치 및 직달일사량계의 원활한 부착을 위해 설치하였다. 지지대의 크기 및 제원은 Table 1-4와 같다.



(a) Detail dimensions



(b) Support fixture model



(c) Real support fixture

Figure 1-10. Support fixture for conical concentrator of 45° cone angle.

Table 1-4 Description about support fixture of conical collector.

Specification	Support fixture of 27° collector	Support fixture of 45° collector
Model	DF 3030 / DF 3060	DF 3030
Material	Aluminium(A6N01S-T5)	Aluminium(A6N01S-T5)
Profile size(mm)	30*30 / 30*60	30*30
Surface Treatment	Anodized	Anodized
Weight(kg/m)	1.07 / 1.8	1.07
Support fixture size(mm)		613*643*530

바. 흡수관 표면 CPV 셀 설비

(1) 집광비 분석

원추형 집광기의 흡수기 표면의 고 집광부에 CPV 셀을 부착하기 위해 위치별 집광비를 분석하였다. 흡수관을 상, 중, 하 3 등분하여 구분하여 상부를 고집광부, 중앙부를 중집광부, 하단 부를 저집광부로 구분하였다(Figure 1-11).

$$\text{집광비} = \frac{\text{원추형 집광기의 집광면적}(m^2)}{\text{흡수관 집광부 표면적}(m^2)}$$

집광비 분석결과 상부의 고집광부의 집광비는 27.20으로 크게 나타났고, 중앙부의 중집광부는 17.30, 하단 부의 저집광부는 7.530으로 나타나 흡수관 상부에 CPV 셀을 부착하는 것이 태양광 발전효율 향상을 위해 매우 유리한 것으로 분석되었다 (Table 1-5).

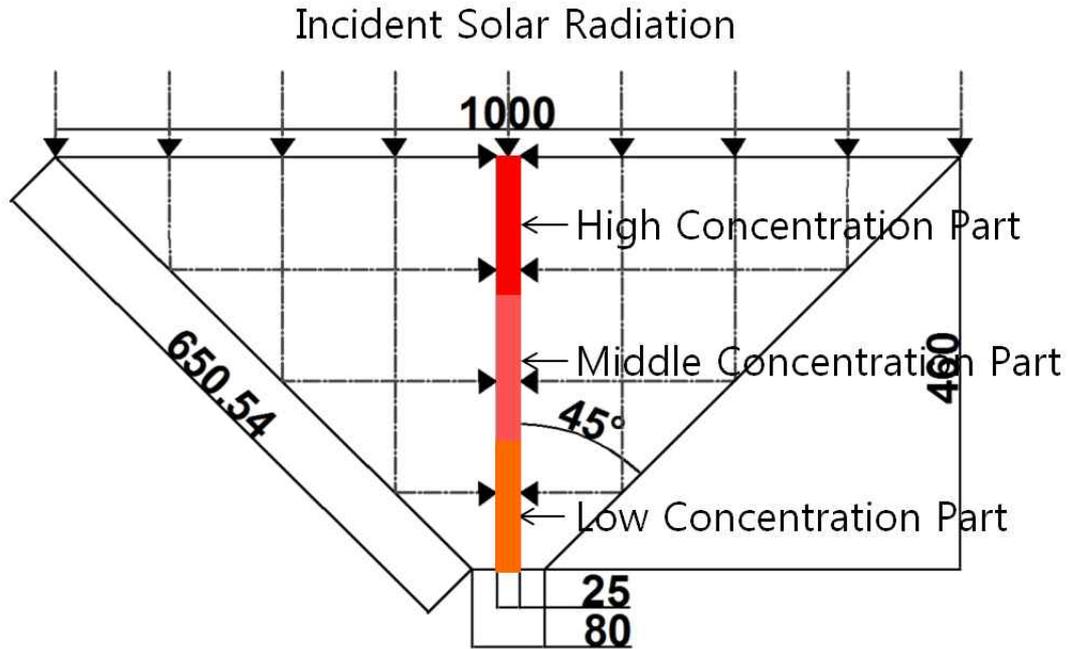


Figure 1-11. Division for concentration ratio of absorber surface with position.

Table 1-5. Concentration ratio of absorber surface with position

구분	원추형 집광기 집광면적(m <sup>2</sup> )	흡수관 집광부 표면적(m <sup>2</sup> )	집광비
흡수관 상부 (고 집광부)	0.408	0.015	27.20
흡수관 중부 (중 집광부)	0.260	0.015	17.30
흡수관 하부 (저 집광부)	0,113	0.015	7.530

## (2) CPV셀 및 흡수기 구성

본 실험에는 CPV셀(CTJ(Concentrating Triple-Junction) Photovoltaic 10mm×10mm Cell, EMCORE, USA)을 사용하였으며 제조사에서 제공하는 CPV셀의 제원과 특성은 Table 1-6, 1-7, 1-8과 같다.

Table 1-6 Nominal temperature coefficients at 50 mW/cm<sup>2</sup>

Parameter	Absolute, 10°C to 100°C Range		Relative, at 25°C	
Efficiency	-0.04	absolute %/°C	-1080	PPM/°C
Vmp	-4.5	milliVolts/°C	-1610	PPM/°C
Jmp	4.7	milliamps/cm <sup>2</sup> /°C	570	PPM/°C
Responsivity@Vmp	7.7	x10 <sup>-5</sup> Amps/Watt/°C	570	PPM/°C

Table 1-7 Typical current-voltage parameters at 50mW/cm<sup>2</sup>, 25°C

Parameter	Value at 25°C 50mW/cm <sup>2</sup>
Efficiency (%)	38.5
Isc (Amps)	7.06
Imp (Amps)	6.92
Voc (Volts)	3.15
Vmp (Volts)	2.75

Table 1-8 CTJ receiver assembly specification

Typical efficiency	37%, 25°C, AM1.5, 100 mW/cm <sup>2</sup>
Cell active area	1.012 cm <sup>2</sup>
Substrate	Direct-bond-copper, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> substrate with Au/ Ni surface plating(copper thickness 0.3 mm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thickness 0.38 mm)
Bypass diode	15A Schottky
Operating temperature	-40°C to 100°C
Max. temperature	180°C

흡수기는 대류 열손실을 줄일 수 있도록 셀의 크기와 같도록 외경 24 mm×24 mm, 두께 1.5mm인 사각 동 파이프로 제작되어 있으며, CPV 셀은 흡수관 상부의 고 집광 4각 표면 각 면에 부착되었다. CPV셀의 배치는 1개의 모듈 당 4행 4열로 배치하여 원추형 집광기 각 모듈 당 16개씩, 따라서 4개의 모듈에 총 64개의 셀을 배치하였으며, 64개의 셀을 32직렬 2병렬로 나누어 전체적으로 약 96V의 전압, 14A의 전류가 출력될 수 있도록 하였다(Figure 1-12). 본 CPV셀 회로의 구성은 하나의 셀이 손상 되더라도 전체 회로도가 끊어지는 것을 방지하여 전력생산이 가능하도록

하였다. 즉, 각 셀마다 하나의 전선으로 연결된 것이 아닌 위, 아래 셀과도 예비전선을 연결하여 하나의 셀이 손상되어도 위, 아래로 전기가 흘러 하나의 셀 만큼만 발전 손실을 보게 되며, 하나의 셀을 교체하는 동안에도 전력 생산이 가능하도록 제작하였다.

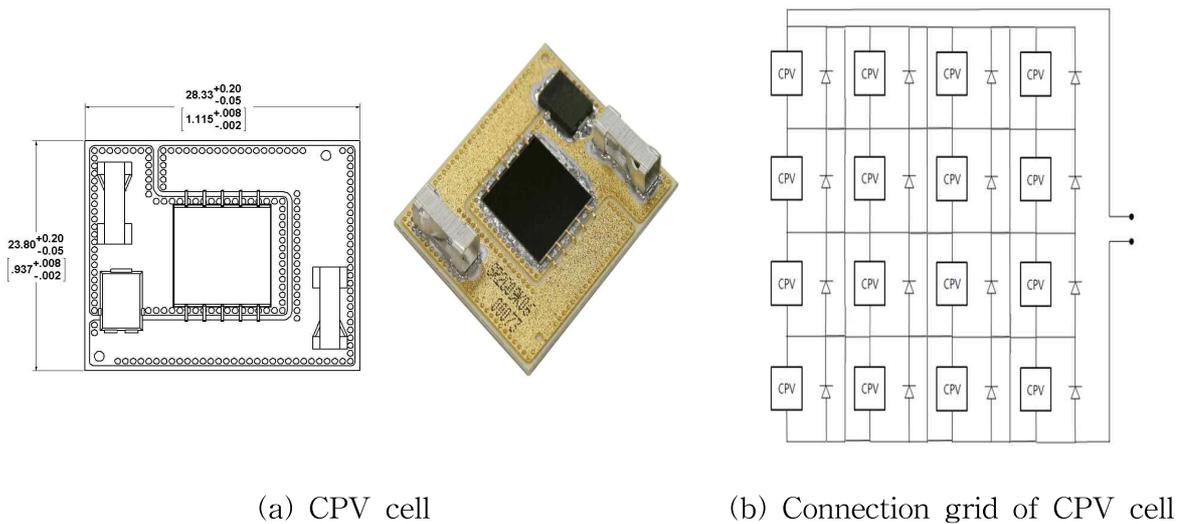


Figure 1-12. CPV cell and connection grid

CPV 셀에서 발생하는 열에너지를 열매체에 잘 흡수 시킬 수 있도록 셀 뒷면에 썬덜 글루(MX-4, ARCTIC, USA)를 도포한 후 흡수기에 부착하여 열저항을 최소화하여 열전달율을 증가시켰다. 썬덜 글루의 제조사에서 제공한 사진과 제원은 Figure 1-13, Table 1-9와 같다.



Figure 1-13. Thermal glue.

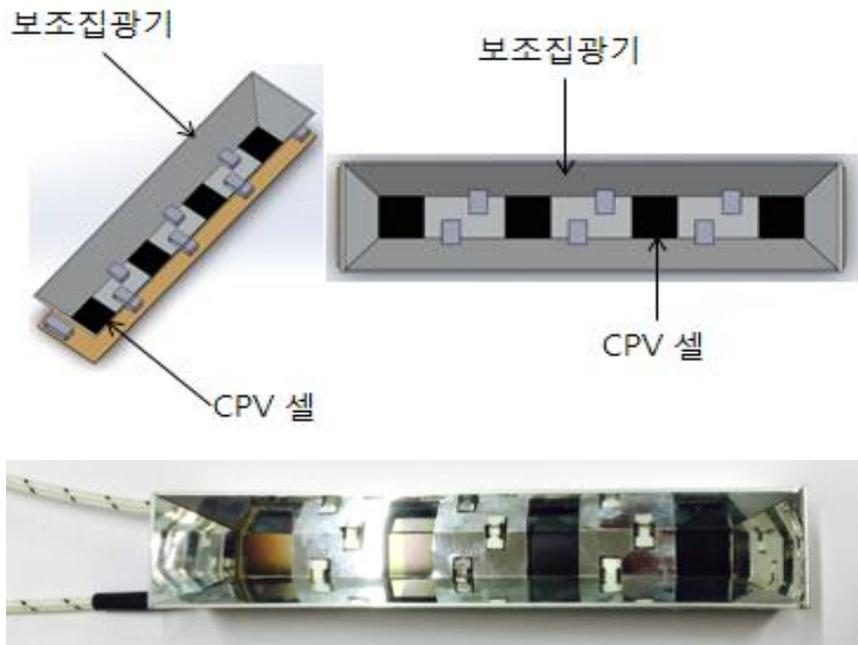
Table 1-9 Properties of thermal glue

Thermal Conductivity	8.5W/mK
Temperature range	-45°C to 200°C
Viscosity	870poise
Density	2.5 g/cm <sup>3</sup>

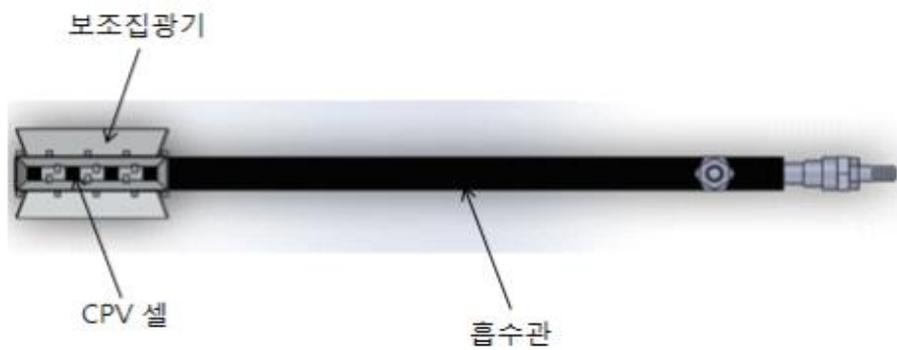
### (3) 보조집광기

보조집광기는 원추형 반사판으로부터 CPV셀 주위에 입사되는 태양광을 부가적으로 더 집광하여 CPV셀에 집광시켜 CPV 셀의 집광비를 높이기 위해 설계 및 제작되었다. 흡수관 한 면에 설치된 4개의 CPV 셀들 전체 주변에 사다리꼴 모양의 반사판을 4면으로 통합한 보조집광기를 설치하여 원추형 반사판으로부터 CPV셀 주위에 집광되는 태양광을 CPV셀 표면에 부가적으로 추가 집광되도록 하여 집광비를 향상시키고, CPV셀 기관의 과열 방지로 인한 CPV 셀 손상을 방지하도록 하였다. Figure 3-14는 원추형 반사판으로부터 CPV 셀 주위로 입사되는 태양광이 부가적으로 CPV 셀에 집광되는 모식도를 나타내고 있다. 보조집광기는 원추형 반사판 제작에 사용된 반사율 96.56%의 알루미늄 반사판을 이용하여 제작하였다. 흡수기 1개의 각 한 면에 부착된 4개의 CPV셀 주위에 1개의 보조집광기가 설치됨으로, 흡수기 1개에 총 4개의 보조집광기가 설치되었다. 보조집광기의 도면은 Figure 1-15와 같으며, 레이저 가공에 의해 정밀하게 절단하여 제작하였다. 흡수기에 부착된 보조집광기의 모형 및 실물은 Figure 1-16과 같다.





(a) Additional solar concentrator



(b) Additional solar concentrator attached at absorber

Figure 1-16. Additional solar concentrator attached at four sides of absorber.

### 3. 집광시스템 부대설비

#### 가. 태양추적장치 설비

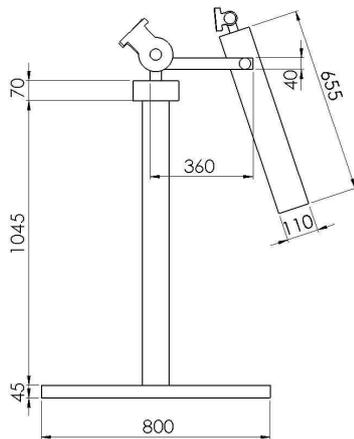
본 연구에서 설비된 태양추적장치는 태양추적 센서와 컨트롤러 및 추적장치로 구성되어 있다. 태양 추적장치(Dual Axis Solar Tracking Sensor, Heliostat, 한국)는 포토다이오드를 사용하는 광 추적식 센서를 사용하고 있으며, 광 파장 센서 영역은 400nm ~ 1200nm이다. 포토다이오드를 동서남북 각 방향에 설치하고 그 가운데 막대를 설치한 형태로 한 쪽 방향으로 그림자가 생기면 포토다이오드가 전류 변화를 감지하여 컨트롤러에 전달시키는 역할을 한다. 컨트롤러는 태양추적 센서에서 온 신호를 감지하여 해당 방향의 모터를 구동시키는 역할을 한다. 추적장치는 태양 고도각 추적을 위한 Linear actuator와 태양 방위각 추적을 위한 Slew driver로 구성되어 있으며 각각 DC모터를 사용한다. 태양추적 장치의 구동주기는 6초이고, 추적에 의한 입사각 오차는 0.025도 이다. Figure 1-17(a, b)는 태양 추적센서와 컨트롤러를 나타내고 있으며, Figure 1-17 (c), (d)는 태양추적장치를 나타내고 있다.



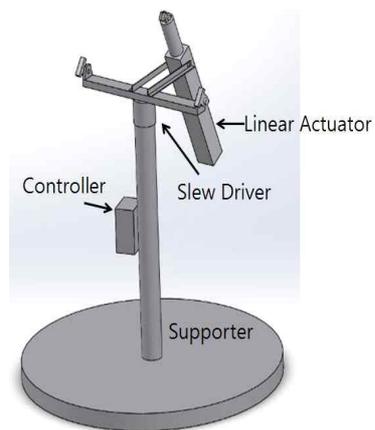
(a) Solar sensor



(b) Tracking controller



(c) Detail dimensions



(d) Solar tracker model

Figure 1-17. Solar tracker.

나. 축열조

(1) 소형 축열조

단일 모듈의 원추형 집광시스템에 사용된 소형의 축열조 도면은 Figure 1-18과와 같으며, 축열조 용량은 200 ℓ 로, 직경 480 mm 및 원통 부분 1,000 mm와 축열조 상부와 하부의 돔 부분 각각 90 mm를 포함하여 축열조 높이는 1,180 mm이다. 축열조 원통 및 상하 돔 부분은 각각 3 mm 와 4 mm 두께의 스테인리스강(STS304)으로 제작되었고, 내통의 외부는 100 mm 두께의 유리섬유(glass wool)로 단열되었으며, 외부 케이스는 0.45 mm 두께의 칼라강판으로 제작되었다(Figure 1-19). 축열조는 450 mm 높이의 강구조물 에 설치되었다. 축열조의 배관 및 온도센서 삽입을 위한 연결부들은 총 9개이며, 축열조 온수 입출구용 3개(1개 예비용), 축열조 내 물의 온도계측을 위한 온도센서(PT100Ω) 삽입구용 3개, 상부에 물 공급 구 및 압력 조절용 배관 2개, 및 하부의 배수구 1개로 구성되어 있다. 축열조의 제원은 Table 1-10과 같다.

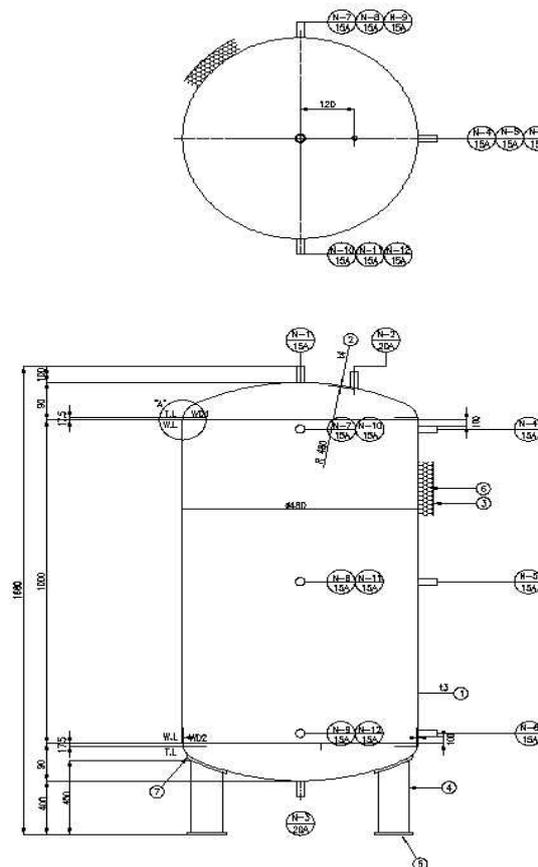


Figure 1-18. Design of storage tank.



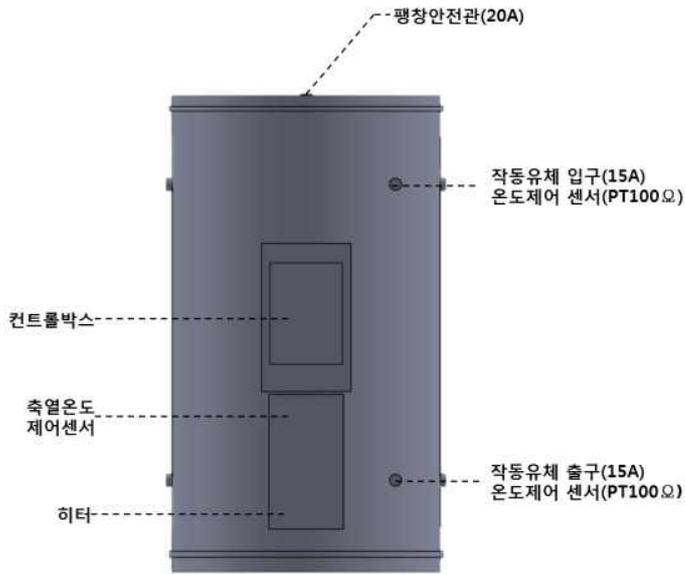
Figure 1-19. Small size of thermal storage tank.

Table 1-10. Specifications of storage tank

번호	명칭	재질	치수
1	내부 스테인레스	STS304	3mm
2	상부 스테인레스	STS304	4mm
3	칼라 강판	강판	0.45mm
4	지지대	SS400	6mm
5	지지대 하부	SS400	6mm
6	단열재	Glass wool	100mm
7	지지대 상부	STS304	6mm

## (2) 대형 축열조

본 연구에서 다 모듈 원추형 집광시스템에 사용된 축열조(DWS-070HEC, 대성에너텍, South Korea)는 다 모듈 원추형 집광기에 의해서 가열된 열매체를 저장할 수 있다. 축열조의 높이 1,610mm, 지름 880mm의 크기로 내구성이 강한 부품을 사용하여 변질이나 변형을 방지하였다(Figure 1-20). 또한 단열성능이 뛰어난 보온자재인 최고급 발포형 폴리우레탄( $0.04\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ) 폼을 사용하여 열손실을 최소화하였다. 원추형 집광기의 흡수기와 축열조 사이의 열매체의 순환을 위해 축열조에 열매체 입구와 출구를 제작하여 흡수기 입·출구와 연결하였으며, 축열조 내 열매체의 정확한 온도 측정을 위해 축열조 상, 하부에 PT100Ω을 각각 두 개씩 설치하였다. 날씨, 주야간 및 일사량의 정도에 따라 태양에너지의 공급이 원활하지 못할 경우, 축열조 내에 설치된 보조열원인 전기히터를 가동하여 축열조 내의 열매체를 적정온도로 유지 시킬 수 있게 하였다.



(a) Thermal storage tank model

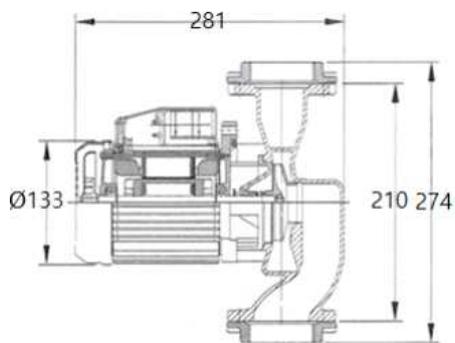


(b) Image of thermal storage tank

Figure 1-20. Large size of thermal storage tank.

다. 순환펌프

순환펌프(PH-089M, 윌로펌프, SOUTH KOREA)는 축열조 내의 작동유체가 유입되어 흡수기를 통과하여 다시 축열조로 돌아오는 순환 과정을 강제적으로 진행시키는 장치로서, 작동유체 순환 경로의 위치상 문제를 해결하고 흡수기 및 파이프 내부의 순환유체가 가득 채워질 수 있도록 한다(Figure 1-21). 순환펌프의 제원은 Table 1-11과 같다.



(a) Detail dimensions



(b) Real circulating pump

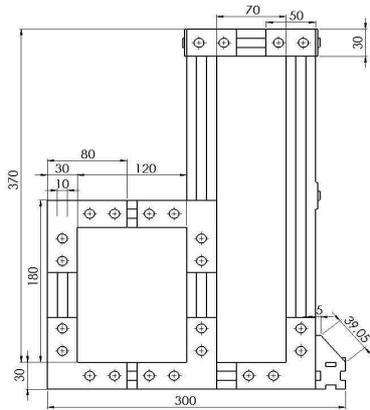
Figure 1-21. Circulating pump.

Table 1-11 Specification of circulating pump.

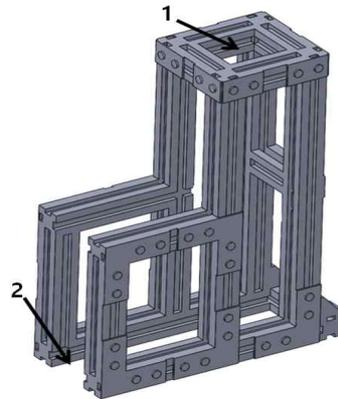
Classification	Value
Power(V)	220
Output(W)	80
Maximum press(kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> )	3
Maximum flow rate(L/min)	115

라. 유량계 지지대

유량계의 수직유지 및 지지 역할을 위한 유량계 지지대는 30mm\*30mm의 알루미늄 프로파일을 사용하여 제작하였다(Figure 1-22). 유량계 지지대의 외형은 ㄷ자 형태이며, Figure 3-15(b)의 1번 표시 부분은 유량계를 위치 및 고정시켜 수직을 유지하도록, 2번 부분은 유량계에 열매체가 순환하는 유동관이 위치할 수 있도록 제작하였다. 알루미늄 프로파일은  $\varnothing 10\text{mm}$  볼트, 너트 및 평 스틸 브라켓을 이용하여 조립하였다.



(a) Detail Dimensions



(b) Support frame of flowmeter



(c) Real support frame of flowmeter



Figure 1-22. Support frame for flowmeter.

## 제 2 절 원추형 집광시스템 성능분석

### 1. 단일 모듈의 원추형 집광시스템 집열성능 실험

#### 가. 단일 모듈의 원추형 집광시스템 집열성능 실험 설비

원추형 집광시스템은 입사된 태양복사에너지를 흡수기에 조사시키는 1개의 원추형 집광기, 태양 복사에너지를 열매체에 전달시키기 위한 흡수기, 태양추적을 위한 Linear actuator와 Slew driver 및 추적센서와 컨트롤러, 축열조, 순환펌프, 온도센서(PT100Ω, Thermocouple), 일사량계로 구성하였다(Table 2-1). 작동유체는 물을 사용하였으며, 축열조에 저장된 작동유체는 순환펌프에 의해 순환되기 시작하여 유량계와 온도센서(PT100Ω)를 지나 흡수기의 Inlet으로 유입되고 흡수기로부터 태양복사에너지를 흡수한 작동유체는 Outlet을 거쳐 온도센서(PT100Ω)를 지나 축열조로 순환되는 과정을 반복한다. 축열조 내에 태양복사열의 축열정도를 계측하기 위해 축열조 상, 중, 하에 온도센서(Thermocouple) 각각 3개 설치하였다. 흡수기 입구와 출구에 설치된 RTD 온도센서에 의해 열매체가 흡수기를 통과할 때 마다 열매체의 입출구 온도변화를 계측하여 Data logger에 저장할 수 있도록 구성하였다(Figure 2-1).

Table 2-1 Conical concentrator systems

Description	Concentrating System of 45° cone angle
Effective concentrating area	0.785m <sup>2</sup>
Reflector material	Aluminium
Insulating material	Polyethylene
Solar Tracking system	Dual axis
Storage tank	type: Cylindrical vertical
	Capacity: 70L
Pump	PH-080M
Flowmeter	P-1407308-2

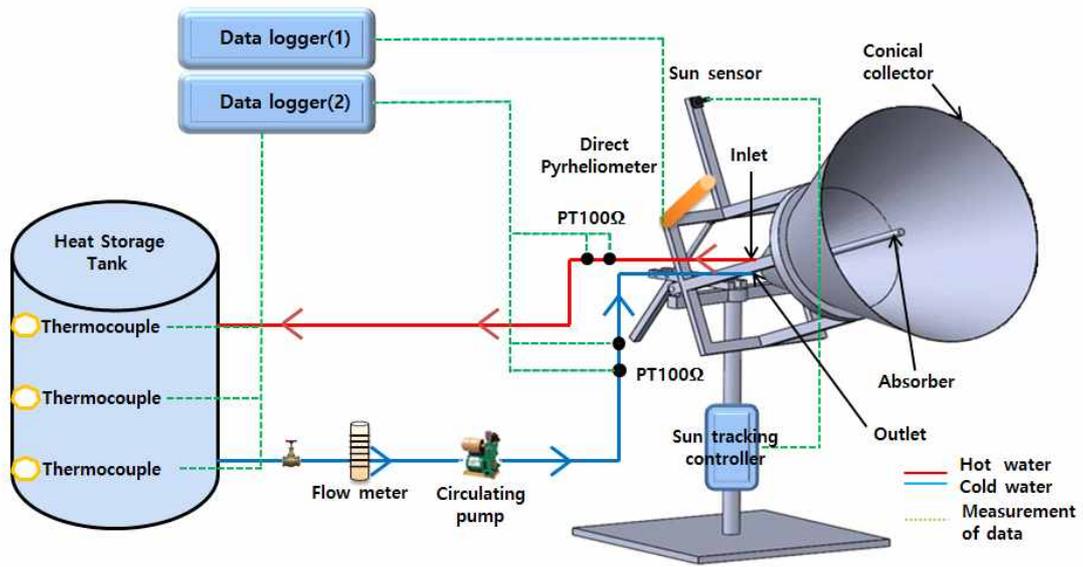


Figure 2-1. Schematic diagram of conical concentrating system.

나. 단일 모듈 원추형 집광시스템 집열성능 실험 방법

본 연구는 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상에 원추형 집광시스템을 설치하여(위도 36° 18', 경도 126° 24', 해발 100m), 청명한 날 오전 10시부터 오후 5시 사이에 성능 실험을 수행하였다. 흡수관 내를 순환하는 유량에 따른 원추형 집광기의 집열효율을 분석하기 위해 동일한 날, 동일한 기상조건하에서 3개의 동일한 원추형 집광기를 가동하고, 유량만을 각각 2L/min, 4L/min, 6L/min으로 다르게 설정하여 집열 성능실험을 수행 하였다(Figure 2-2).



Figure 2-2. Experimental setup of conical concentrator system.

## 2. 다 모듈의 원추형 집광시스템 집열성능 실험

### 가. 다 모듈의 원추형 집광시스템 집열성능 실험 설비

본 연구에서 다 모듈 원추형 태양열 집광시스템은 태양복사에너지를 열에너지로 전환시켜주는 4개의 원추형 태양열 집광기와 집열된 태양복사에너지의 흡수를 위해 각 집광기 중심에 설치된 4개의 일체화된 흡수기, 열에너지 저장을 위한 1,000L 용량 1개의 축열조 및 태양추적장치 등으로 구성되어있다. 4개의 원추형 태양열 집광기는 원뿔 모양의 반사판에 의해서 반사된 태양복사에너지를 각 집광기 중앙에 위치한 이중관형태의 각 4개 흡수기 표면에 집열 시킨다. 태양복사에너지에 의해 각 4개의 흡수기 내에서 가열된 열매체는 순환펌프를 통해 축열조 내의 열교환기를 거쳐 축열조 내에 저장된 열매체를 가열하고 다시 각 4개의 집광기 중심에 설치된 흡수기 내를 순환하게 된다.

다 모듈의 원추형 집광시스템에서 원추형 태양열 집광기 4개는 2×2 행렬로 설치하였고, 각 원추형 집광기 중심에 설치된 4개의 흡수기는 하나의 열매체 입구와 출구로 통합 설치되었다(Figure 2-3). 흡수기의 표면은 태양에너지를 최대한 흡수 할 수 있도록 무광의 흑색으로 도장처리 하였으며, 태양복사열을 효과적으로 집열하기 위하여 태양의 위치에 따라 고도각과 방위각을 추적하는 2중축 추적 장치를 사용하였다. 열매체의 입·출구와 축열조 상·하부에 온도센서를 설치하여 온도데이터를 수집할 수 있도록 구성하였다(Table 2-2). 구성된 원추형 태양열 집광시스템의 개략도는 Figure 2-4와 같다.



Figure 2-3 Experimental setup of conical solar concentrator system.

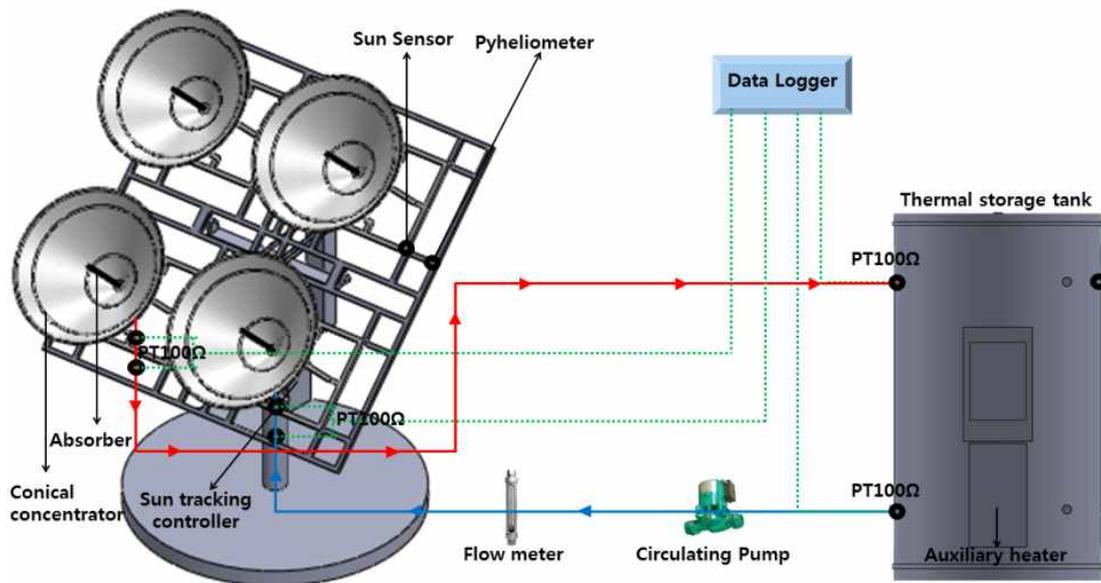


Figure 2-4 Schematic diagram of conical solar concentrator system.

Table 2-2 Specifications of conical solar concentrator system

Items	Specifications
Solar concentrator	Conical solar concentrator
Reflector material	Aluminium
Absorber	Double tube absorber
Solar tracking system	Dual axis
Flow meter model	PA-601
Circulating pump model	PH-045M
Collecting area (m <sup>2</sup> )	0.785 × 4
Thermal storage tank capacity (L)	500

#### 나. 다 모듈 원추형 집광시스템 집열성능 실험 방법

본 연구에서는 외기 조건에 따른 원추형 태양열 집광시스템의 성능분석을 수행하였으며, 성능실험은 강원대학교 농업생명과학대학교 1호관 옥상(위도:37°52', 경도:127°44')에서 진행되었다. 성능분석을 위해 열매체로 물을 사용하였으며, 청명한 날 축열조 내 열매체의 용량을 500L하여 실험을 수행하였다. 집열효율에 중요한 영향을 미치는 요소인 열매체의 순환유량을 3L/min, 4L/min, 5L/min, 6L/min으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 유량에 따른 성능분석 결과를 토대로 원추형 태양열 집광시스템의 최고효율을 갖는 순환유량을 규명하여, 해당유량에서 열매체 유입온도 변화에 따른 집열효율을 비교하여, 열매체 온도가 상승함에 따라 집열효율의 감소량을 분석하였다.

#### 3. 성능평가 기준

본 실험에 사용된 추적식 원추형 집광기에 대한 성능평가 기준은 마련되어 있지 않기 때문에 유사한 시스템의 성능평가 기준인 한국산업규격(KS)의 태양열 집열기 시험방법 -제 1부: 집열창이 없는 압력강하가 발생하는 액체식 집열기(현열만 이용)의 열적성능(KS B ISO 9806-3:2003)을 적용하여 실험을 수행하였다. 성능평가기준에 언급된 기준과 같이 집광기의 흡수관 표면에 투사되는 순수 태양일사량이 650W/m<sup>2</sup> 이상일 때에 실험을 수행하였으며, 사용된 전자 계측 장비와 집광 면적에 대해 오차율 1%이하로 유지하였다. 온도센서의 샘플링 간격은 30초 이하를 유지하였으며, 온도 센서의 위치는 집광기의 흡수관 입·출구 관내에 설치하여 열매체 온도를 측정하였다. Table 2-3은 측정기간 동안 측정 인자들의 허용 오차를 나타낸다.

Table 2-3 Allowable deviation of measurement factor

Factor	Allowable deviation
Solar radiation(W/m <sup>2</sup> )	±50
Long wave radiation(W/m <sup>2</sup> )	±20
Ambient temperature(K)	±1
Mass flow rate(%)	±1
Temperature at inlet(K)	±0.1
Air speed(%)	±10

#### 4. 성능실험을 위한 계측 장치

##### 가. 온도 측정

원추형집광기의 Inlet, Outlet 및 축열조의 온도측정을 위하여 RTD (PT100Ω, PHOENIX, USA)과 Thermocouple (T2-T-0.32, SM INSTRUMENTS, SOUTH KOREA)을 사용하였다(Figure 2-5). 정확한 온도 측정을 위하여 RTD 및 Thermocouple은 0°C와 100°C에서 Calibration하였으며, RTD 및 Thermocouple을 흡수기의 Inlet과 Outlet에 각각 2개씩 설치하였다. 축열조 내의 열매체 성층현상을 감안하여 축열조의 상, 중, 하부에 Thermocouple을 각각 한 개씩 설치하여 축열조 내의 열매체 온도를 측정하였다. 온도자료 수집은 Data logger (GI820,GRAP-HTEC,USA) 2대를 사용하였으며, 측정은 2초 간격으로 1분 단위 평균 데이터를 수집하였다. RTD, Thermocouple 및 Data logger의 사양은 Table 2-4에 나타내었다.



Figure 2-5. RTD, Thermocouple and Data logger.

Table 2-4 Specification of RTD, Thermocouple and data logger

Specification	Measuring range	Error range	Note
RTD(PT100Ω)	-200℃ ~ 650℃	±0.15℃+0.002℃/t	DIN43760 Class A
Thermocouple	-270℃ ~ 400℃		
Data Logger (GL800)	-100≤TS≤1370℃	±(0.05% of rdg +1℃)	Using K-type

나. 일사량 측정

실험기간 동안 직달 일사량을 측정하기 위하여 높은 정확도를 갖는 직달 일사량계(DR01 Direct Pyrheliometer, Hukseflux, Netherlands)를 사용하였으며, 일사량계는 2축의 태양 추적장치와 함께 원추형 집광기 지지대 상부에 부착되어 항상 태양과 수직을 유지하도록 설치하였다. 측정된 직달일사량 값은 W/m<sup>2</sup>의 단위로 나타나며 Data logger(LI-19)에 직접 연결하여 데이터를 수집하였다(Figure 2-6). 직달 일사량계 및 Data logger의 제원은 Table 2-5, Table 2-6과 같다.



(a) Direct pyrheliometer

(b) Data logger

Figure 2-6 Direct pyrheliometer and Data logger.

Table 2-5 Specification of direct pyrheliometer

Parameters	Value
Spectral range(nm)	200 ~ 4000
Response time(s)	18
Full opening view angle(Degrees)	5
Slope angle(Degrees)	1
Irradiance range(W/m <sup>2</sup> )	0~2000
Sensitivity(μv/w/m <sup>2</sup> )	10
Temperature range(°c)	-40 ~ 80
Temperature dependence(%/°c)	< 0.1
Non stability(drift)(%/year)	1
Calibration traceability	WRR

Table 2-6 Specification of data logger

Parameters	Value
Spectral range(nm)	305 ~ 2800
Sensitivity( $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ )	15
measuring range( $\text{W}/\text{m}^2$ )	0 ~ 2000
Operation temperature range( $^{\circ}\text{C}$ )	-10 ~ 40
Temperature dependence( $\%/^{\circ}\text{C}$ )	< 0.1
Sampling rate(/sec)	1
Memory(samples)	3518
size(mm)	138*91*41
Wight(g)	230

다. 유량 측정

집열효율에 영향을 미치는 요소 중 하나인 유량을 측정하기 위해 본 연구에서 사용한 유량측정장치는 유리관 부유식 면적 유량계(PA-60, KOMETER, SOUTH KOREA)로서, 장소가 협소한 곳에 설비하기 적합하며, 실험에 요구되는 1~10  $\ell$  /min의 적절한 유량 범위를 갖는다(Figure 2-7). 유량계의 제원은 Table 2-7과 같다.



Figure 2-7. Flowmeter.

Table 2-7 Specification of Flowmeter

Classification	Value
Model	PA-601
Measured fluid	Gas and Liquid
Range ability	10 : 1
Pressure range	Max. 10 kgf/cm <sup>2</sup> .G
Temperature range	Max. 120 $^{\circ}\text{C}$
Allowable thermal shock	Max. 80 $^{\circ}\text{C}$
Accuracy	$\pm 2$ % F.S

라. 외기환경 측정

본 연구에서 외기환경 측정을 위해 기상관측장비(Wireless Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments, USA)을 사용하였으며, 원추형 태양열 집광시스템의 설비 위치에서 5m내의 지점에 설치하여 외기온도와 풍속 데이터 등 실시간으로 수집하였다(Table 2-8, Figure 2-8).

Table 2-8 Specifications of Wireless Vantage Pro2 Plus

Items	Specifications	
Model	Wireless Vantage Pro2	
Wind Speed	Range (m/s)	1 ~ 67
	Accuracy (m/s)	1
Outside temperature	Range (°C)	-40 ~ 65
	Accuracy (°C)	0.5
Outside humidity	Range (%)	0 ~ 100
	Accuracy (%Rh)	5
Solar irradiance	Range (W/m <sup>2</sup> )	0 ~ 1800
	Accuracy (%)	5
Atmospheric pressure	Range (mm Hg)	660 ~ 810
	Accuracy (mm Hg)	0.8
Realtime data	Accuracy (sec/mon)	0.8
UV Index		0 ~ 16



Figure 2-8. Wireless Vantage Pro2 Plus.

5. 원추형 집광기 집열효율 계산

원추형 집광기의 효율( $\eta$ )은 일반적으로 식 (2-1)과 같이 계산된다.

$$\eta = \frac{Q}{AG''} \dots\dots\dots(2-1)$$

Q= useful energy gain (W)

A= collector area (m<sup>2</sup>)

G''= Pure solar radiation(W/m<sup>2</sup>)

순수 태양 일사량(G'')은 다음 식 (2-2)로 구할 수 있다.

$$G'' = G + \frac{\varepsilon}{\alpha}(E_L - \sigma T_a^4) \dots\dots\dots(2-2)$$

G= global solar radiation(W/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = emissivity

$\alpha$  = absorptivity

E<sub>L</sub>= long wave radiation(W/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  = Stefan-Boltzman constant(Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>)

T<sub>a</sub>= ambient temperature(°C)

태양열 집광기에 집열된 단위시간당 흡수된 열량(Q)은 다음 방정식으로 나타낸다.

$$Q = \dot{m}c_f(T_o - T_{in}) \dots\dots\dots(2-3)$$

Q= usefull heat collected

$\dot{m}$ = mass flow(kg/s)

c<sub>f</sub>= specific heat(J/kg°C)

T<sub>o</sub>= outlet temperature of thermal fluid(°C)

T<sub>in</sub>= inlet temperature of thermal fluid(°C)

직달 일사량계를 사용할 경우 순수 태양 일사량을 직달일사량계로부터 측정된 일사량(I)으로 대체 사용할 수 있으므로 효율( $\eta$ )은 식 (2-4)와 같이 계산된다.

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{AI} \dots\dots\dots(2-4)$$

$I$ = direct radiation( $w/m^2$ )

집열기의 효율 특성 분석은 식 (2-5)를 사용하여 분석될 수 있다.

$$\eta = \eta_0 - a \times (T_r - T_a) / I \dots\dots\dots(2-5)$$

$\eta_0$ = maximum efficiency

$a$ = loss factor

$T_r$ = thermal fluid temperature( $^{\circ}C$ )

$T_a$ = ambient temperature( $^{\circ}C$ )

작동유체의 평균온도( $T_r$ )는 식 (2-6)과 같이 계산된다.

$$T_r = \frac{(T_o + T_i)}{2} \dots\dots\dots(2-6)$$

$T_o$ = outlet temperature of thermal fluid

$T_i$ = inlet temperature of thermal fluid

## 6. MATLAB을 이용한 다 모듈의 원추형 집광시스템 성능분석

본 연구에서 원추형 태양열 집광시스템의 집열 성능을 분석하기 위해 MATLAB R2015a (Mathworks, Natick, USA)을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 전산해석 시 에너지방정식을 풀기 위해 MATLAB 함수 중 급경사 미분방정식(Stiff differential equation)을 사용하였다. 전산해석은 실험조건과 동일한 유량과 외기 조건하에서 실시하였다. 미분방정식으로부터 얻는 온도 프로파일을 이용하여 Fig. 15와 같이 구성된 원추형 태양열 집광시스템의 집열 성능을 분석하였다. 전산해석을 통한 집열 성능분석은 다음과 같은 가정을 통하여 진행되었다.

- 완벽한 추적으로 항상 태양에너지는 정상적으로 유지된다.
- 각각의 원추형 태양열 집광기로 들어오는 태양복사에너지는 같다.
- 열매체의 양은 어느 한곳 누수 없이 이동하며, 일정한 순환유량을 유지한다.

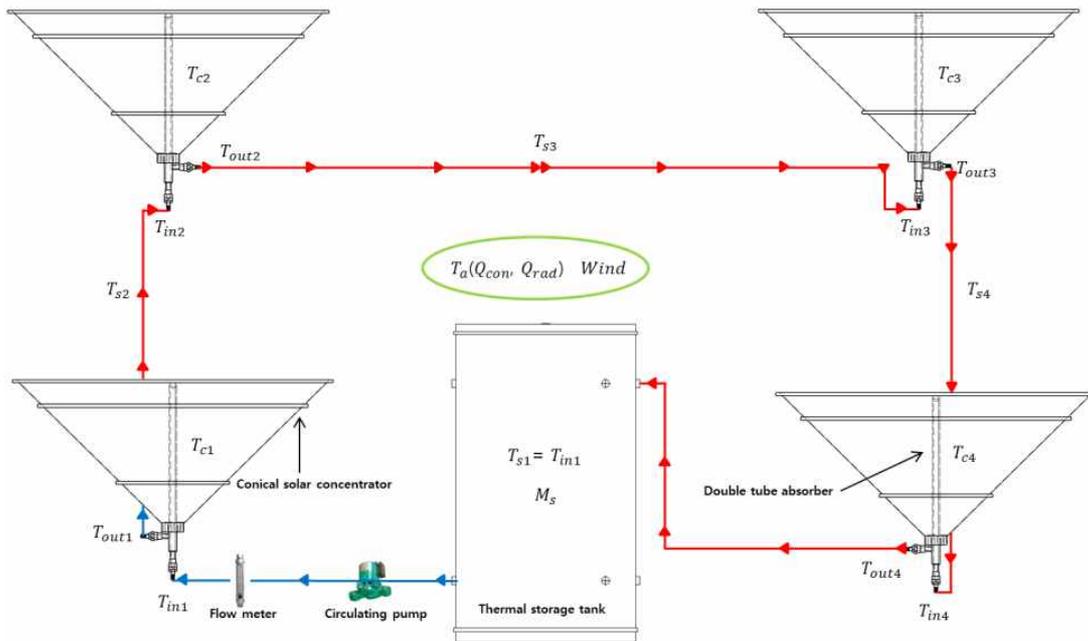


Figure 2-9. Schematic diagram of conical solar system for MATLAB.

원추형 태양열 집광기로부터 들어오는 태양에너지, 이중흡수기, 축열조 등으로 구분하여 각 부분에 대한 에너지 방정식 수립을 통해 1차원 전산해석을 수행하였다 (Figure 2-10). 또한 원추형 태양열 집광시스템 효율에 중요한 요소인 일사량, 외기 온도, 풍속 등 실제 데이터를 반영하였으며, 전산해석 시 초기온도는 이중흡수기 입구의 열매체 온도로 설정하였다. 1차원 열 해석위한 모델의 주요 파라미터는 Table 2-9와 같다.

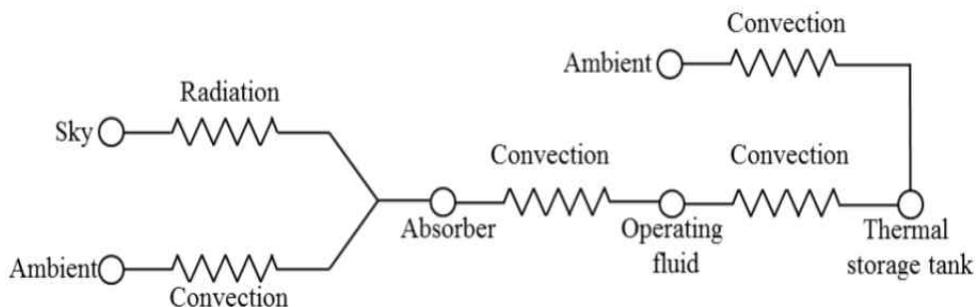


Figure 2-10 Thermal process of heat transfer in the studied conical solar system.

Table 2-9 Parameter values for analysis using MATLAB

Items		Values
$A$	Area of conical solar concentrator aperture (m <sup>2</sup> )	0.785
$A_c$	Double tube absorber area (m <sup>2</sup> )	0.046
$A_s$	Thermal storage tank area (m <sup>2</sup> )	8.9
$C_c$	Specific heat of copper (J/kg °C)	383
$C_p$	Specific heat of water (J/kg °C)	4186
$M_c$	Mass of double tube absorber (kg)	0.65
$M_s$	Mass of water in storage tank (kg)	500
$\dot{m}$	Flow rate (kg/s)	0.067
$T_a$	Ambient temperature (°C)	Measured
$u_a$	Wind speed (m/s)	Measured
$I_a$	Direct solar radiation (W/m <sup>2</sup> )	Measured
$\alpha$	Absorptance of double tube absorber surface	0.9
$\beta$	Reflectivity of conical solar concentrator	0.9
$\sigma$	Stefan-Boltzmann's constant (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	5.67×10 <sup>-8</sup>
$\varepsilon$	Emissivity of absorber surface	0.9

식 (2-7)는 축열조 내 에너지의 변화와 외기와의 열손실로 발생하는 열전달을 기준으로 이중흡수기와 축열조의 에너지평형방정식을 나타냈다. 축열조 내 열매체는 잘 혼합되어 있다고 가정한다. 이중흡수기를 지나 가열된 열매체가 축열조로 유입되는 과정을 반복 수행하다. 그러나 2x2 행렬로 구성된 원추형 집광시스템인 것을 감안하여 첫 번째 이중흡수기를 지나 네 번째 이중흡수기로 네 번의 과정이 반복하여 진행되었다.

$$M_s C_p \frac{dT_{s(n)}}{dt} = \dot{m} C_p (T_{out(n)} - T_{s(n)}) - U_s A_s (T_{s(n)} - T_a) \quad (2-7)$$

여기서,

$M_s$  = 축열조 내 열매체의 질량(kg)

$C_p$  = 축열조 내 열매체의 비열(J/kg °C)

$T_s$  = 축열조 내 열매체의 온도(°C)

$\dot{m}$  = 열매체의 유량(kg/s)

$T_{out}$  = 이중흡수기의 출구온도(°C)

$U_s$  = 총괄 열전달 계수(W/m<sup>2</sup>°C)

$A_s$  = 축열조의 면적(m<sup>2</sup>)

$T_a$  = 외기온도(°C)

$n$  = n번째의 원추형 태양열 집광기

고체 벽을 관통해서 열이 한쪽의 유체에서 다른 쪽의 유체로 전달 될 때의 열전달 계수( $U_s$ )는 식 (2-8)과 같이 계산하였다.

$$U_s = \frac{1}{1/h_1 + l/k + 1/h_2} \quad (2-8)$$

여기서,

$h_1$  = 외기의 대류 열전달 계수

$h_2$  = 축열조 내 대류 열전달 계수

$l$  = 축열조 두께

$k$  = 축열조 내 열전도율

원추형 태양열 집광시스템의 열전달 특성은 주로 열손실에 따라 달라지며, 주로 이중흡수기에서 대부분 일어난다. 에너지는 부분적으로 대류와 복사에 의해 손실되고, 나머지는 열전달을 통해 열매체를 가열하는데 사용된다. 식 (2-9)은 이중흡수기 표면에서의 에너지평형방정식이다.

$$M_c C_c \frac{dT_{c(n)}}{dt} = Q_{use} - h_w A_c (T_{c(n)} - T_{out(n)}) \quad (2-9)$$

여기서,

$M_c$  = 이중흡수기의 질량(kg)

$C_c$  = 이중흡수기의 비열(J/kg°C)

$T_c$  = 이중흡수기의 표면온도(°C)

$h_w$  = 대류열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C)

$A_c$  = 이중흡수기의 면적(m<sup>2</sup>)

$Q_{use}$ 는 총 태양복사에너지량과 대류와 복사로 인한 열손실의 차로 식 (2-10)과 같다.

$$Q_{use} = Q_{total} - Q_{loss} \quad (2-10)$$

원추형 태양열 집광기를 통해 이중흡수기로 입사되는 총 태양복사에너지량은 식 (2-11)과 같다.

$$Q_{total} = \alpha\beta I_a A \quad (2-11)$$

여기서,

$\alpha$  = 이중흡수기의 흡수율

$\beta$  = 원추형 태양열 반사판의 반사율

$I_a$  = 직달일사량(W/m<sup>2</sup>)

$A$  = 원추형 태양열 집열기의 개구면적(m<sup>2</sup>)

이중흡수기와 외기온도차에서 발생하는 대류와 복사로 인한 열손실은 식 (2-12)과 같다.

$$Q_{loss} = Q_{con} + Q_{rad} \quad (2-12)$$

이중흡수기 표면으로부터 대류와 복사로 인한 열손실은 식 (2-13), (2-14)와 같다.

$$Q_{conv} = (3 + 2.8u_a) \times A_c \times (T_c - T_a) \quad (2-13)$$

$$Q_{rad} = \sigma\varepsilon(T_c^4 - T_a^4) \quad (2-14)$$

여기서,

$u_a$  = 풍속(m/s)

$\sigma$  = 스테판-볼츠만상수(W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$\varepsilon$  = 이중흡수기 표면의 방사율

이중흡수기 내 열매체의 대류열전달계수  $h_w$ 는 식 (2-15)와 같다.

$$h_w = \frac{Nu \times k}{D_h} \quad (2-15)$$

여기서,

$Nu$  = 너셀 수

$k$  = 열매체의 전도도(W/m°C)

$D_h$  = 수력학적 지름(m)

Nusselt number와 Reynolds number를 구하기 위해 식 (2-16), (2-17), (2-18)을 이용하였다.

$$Nu = \frac{h_w D_h}{k} \quad (2-16)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (2-17)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2-18)$$

여기서,

$\rho$  = 열매체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$V$  = 속도 (m/s)

$\mu$  = 점성계수(kg·s/m<sup>2</sup>)

$P$  = 윤변(m)

식 (2-19)는 이중흡수기 출구의 열매체온도에 대한 에너지평형방정식이다.

$$M_{out} C_p \frac{dT_{out(n)}}{dt} = h_w A_c (T_{c(n)} - T_{out(n)}) - \dot{m} c_p (T_{out(n)} - T_{s(n)}) \quad (2-19)$$

여기서,

$M_{out}$  = 이중흡수기 내 열매체의 질량(kg)

## 7. 소형 축열조 성능분석 실험

제작된 축열조는 지지대 부분과 축열조 상부에서 발생하는 열손실을 최소화하기 위해 100 mm 두께의 보온재를 추가로 부착였고, 축열조 외부를 보온 청 테이프로 감싸 Figure 2-11과 같이 성능분석에 사용되었다. Figure 2-12는 축열조의 열전달 분석을 위한 원통 반경방향의 벽면 구성도이다. 본 실험은 외부로의 열손실로 인해 축열조 내의 가열된 물의 온도가 시간에 따라 낮아지는 정도를 분석하기 위해 수행되었다. 축열조 내의 물은 축열조 내부 원통으로 대류에 의한 열손실, 축열조 원통 자체에 의한 전도 열손실, 단열재(glass wool)를 통한 전도 열손실, 외부케이스인 칼라강판을 통한 전도 열손실 및 칼라강판에서 외부공기로의 대류 열손실이 발생한다. 여기서 축열조 내 물의온도를  $T_{\infty 1}$ , 축열조 원통 내부 및 외부 온도를 각각  $T_1$ ,  $T_2$ , 단열재 외부 표면온도를  $T_3$ , 칼라강판 외부 표면의 온도를  $T_4$ , 외부공기 온도  $T_{\infty 2}$ 라 칭하였다. 열손실에 의해 축열조 내 가열된 물의 시간에 따른 온도 감소정도를 실험에 의해 측정된 값과 반 실험적 방법으로 예측한 온도 값 비교하여 분석하였다. 축열조 내의 물을 전기히터를 이용해  $80.98^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 후  $T_{\infty 1}$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_{\infty 2}$ 의 온도를 K-Type의 Thermocouple에 연결된 Data Logger를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다. 축열조 열전달 계산에 이용된 식 (2-20)는 다음과 같다.

$$q = h_{\infty 1} A_1 (T_{\infty 1} - T_1) = \frac{2\pi L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)/k_s} = \frac{2\pi L (T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)/k_g} = \frac{2\pi L (T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)/k_s} = h_{\infty 2} A_2 (T_4 - T_{\infty 2}) \quad (2-20)$$

식 2-7에서  $q$  = 열전달량 ( $W$ ),  $h_{\infty 1}$  = 물의 대류열전달계수 ( $W/m^2K$ ),  $h_{\infty 2}$  = 공기의 대류열전달계수 ( $W/m^2K$ ),  $k_s$  = 스테인레스의 전도열전달계수 ( $W/mK$ ),  $k_g$  = Glass wool의 전도열전달계수 ( $W/mK$ ),  $r$  = 축열조의 반지름 ( $m$ ),  $A$  = 면적 ( $m^2$ ),  $T$  = 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )이다. 식 (2-20)의 방정식을 이용하여 미지수인  $h_{\infty 1}$ (물의 대류열전달계수)와  $h_{\infty 2}$ (외부 공기의 대류열전달 계수)를 구하여 축열조 내 물의 온도변화를 예측하는데 사용하였다. 열전달 계산식에 사용된 값은 Table 2-10와 같다.



Figure 2-11 Storage tank for efficiency test.

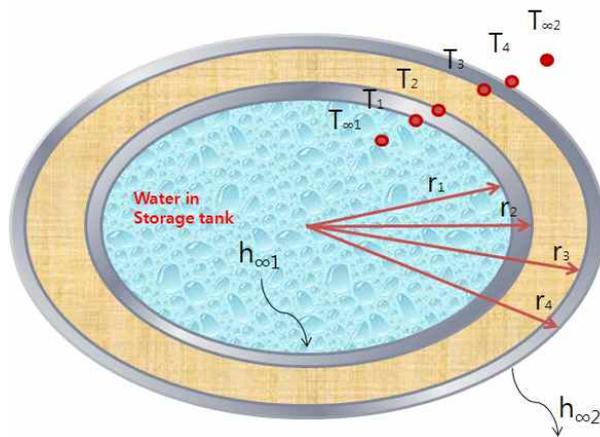


Figure 2-12. Heat transfer model for wall of storage tank.

Table 2-10 Values used in heat transfer equation

명칭	값
스테인레스의 전도열전달계수( $k_s$ )	14.9 W/mK
Glass wool의 전도열전달계수( $k_g$ )	0.031 W/mK
$r_1$	0.34 m
$r_2$	0.343 m
$r_3$	0.443 m
$r_4$	0.44345 m
축열조의 높이( $L$ )	1 m
축열조 내부 면적( $A_1$ )	2.14 m <sup>2</sup>
축열조 외부 면적( $A_2$ )	2.78 m <sup>2</sup>

## 8. 흡수관 내 열매체 및 표면 온도분포 분석 방법

열화상 카메라(G100EX, NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd, Tokyo)를 이용하여 흡수관 표면의 온도분포를 분석하였으며(Figure 2-13), CFD를 이용해 열매체 및 흡수관 주변의 열유동을 해석하였다. CFD 해석을 위해 ANSYS(v.13, ANSYS Inc., USA) 프로그램 중 DesignModeler 프로그램을 이용하여 해석모델을 디자인하고 Meshing 프로그램을 이용하여 격자를 생성하였으며, Fluent 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.



Figure 2-13. Thermo Gear G100.

## 제 3 절 원추형 태양광-열 복합시스템 성능분석

### 1. 단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템 집열 및 발전 성능실험 방법

단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템은 원추형 집광시스템의 흡수기 표면의 고집광부에 태양광 발전을 위해 보조집광기와 CPV 셀을 부착한 것으로, 전압 및 전류 출력을 측정하기 위한 solar module analyser가 연결되어 있다(Figure 3-1). 단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능분석을 위해 CPV 셀의 생산전력을 측정하는 것 외에는 원추형 집광시스템의 집열효율 분석을 위해 사용된 직달 일사량계, 온도측정을 위한 Data Logger 등의 같은 계측장비가 그대로 사용되었다.

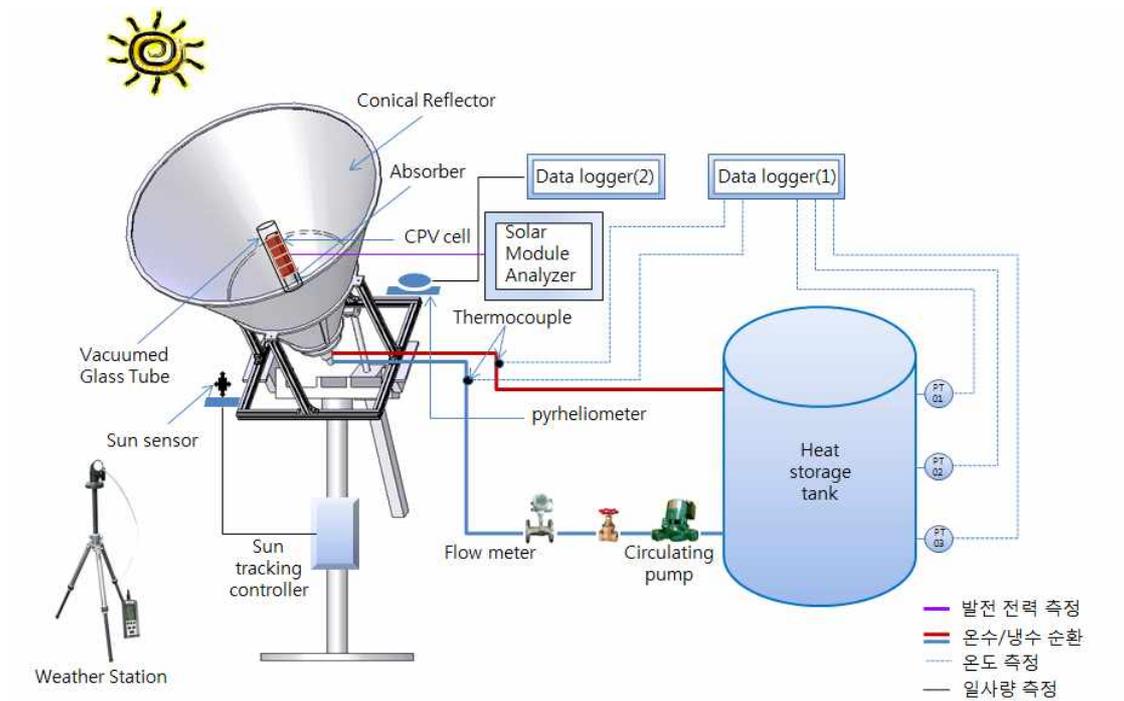


Figure 3-1. Schematic diagram of conical CPV/T combined solar concentrating System.

## 2. 원추형 태양광-열 복합시스템의 발전효율 계산

전압 및 전류 측정은 PROVA Instruments사의 PROVA 210 solar module analyzer를 사용하여 개방전압, 단락전류, 최대전압, 최대전류, 최대전력, 충전률(FF : Fill Factor)를 측정하였다. 측정범위에서의 정밀도는 Table 3-1과 같으며, solar module analyzer의 측정 원리는 Figure 3-2와 같다.

Table 3-1 Solar module analyzer properties

Measurement	Range	Resolution	Accuracy
DC Voltage	0~10V	0.001V	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } V_{\text{open}} \pm 0.1V)$
	10~60V	0.01V	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } V_{\text{open}} \pm 0.1V)$
DC Current	0.01~10A	1mA	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } I_{\text{short}} \pm 9mA)$
	10~12A	10mA	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } I_{\text{short}} \pm 0.09A)$

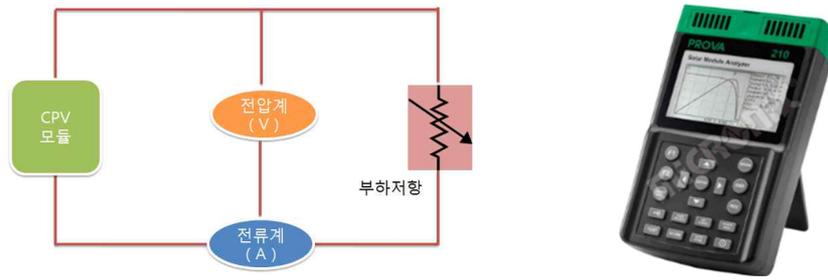


Figure 3-2 Solar module analyser

발전효율은 태양전지 성능을 다른 태양전지와 비교할 때 가장 널리 사용되는 성능인자이다. 발전효율은 태양으로부터의 입력 에너지 대비 태양전지로부터의 출력 에너지 비로 정의한다. 태양전지 자체의 성능을 반영하는 것 외에도 효율은 입사 태양광의 스펙트럼과 세기, 온도 등에 의존한다. 태양전지 사이의 성능을 비교하기 위해서는 보통 지상용은 AM1.5와 25°C 온도 조건에서 측정하고 우주용은 AM0 조건에서 측정한다. 태양전지의 효율은 전력으로 변환되는 입사 태양광 세기의 비율로 식(3-1)과 식(3-2)을 이용하여 계산한다.

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF \text{ ----- (3-1)}$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \text{ ----- (3-2)}$$

여기서 FF는 충전률,  $\eta$ 은 효율,  $P_{in}$  입사된 일사 에너지이다.

### 3. 원추형 태양광-열 복합시스템의 평가기준

원추형 태양광-열의 성능평가 기준은 원추형 집광시스템과 동일하게 한국산업규격(KS B ISO 9806-1)를 준수하였으며, CPV 셀에 대한 성능평가는 한국산업규격의 집광형 태양광 발전(CPV) 모듈 및 조립품 설계 검증 및 형식승인(KS C IEC 62108:<sup>2009</sup>) 기준에 따라 청명한 날 법선면 직달일사량이 700W/m<sup>2</sup> 이상이며 변동치가 5분 간격으로 20% 미만, 풍속이 6m/s 미만, 수행하기 이전 10분 동안 10m/s 이상의 돌풍이 없는 기후 조건과 열매체 유속이 2% 이상 변하지 않는 범위에서 이루어 졌다.

#### 4. 단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템 성능실험 방법

본 연구는 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상에 원추형 집광시스템을 설치하여(위도  $36^{\circ} 18'$ , 경도  $126^{\circ} 24'$ , 해발 100m), 청명한 날 오전 10시부터 오후 5시 사이에 성능 실험을 수행하였다. 원추형 집광시스템의 집열효율 분석 결과에 따라, 최고의 집열효율을 나타내는 4L/min의 일정한 유량 조건하에서 성능실험을 수행하였다. 태양광 발전효율은 solar module analyser의 전압, 전류, 출력값 측정 결과로 분석하였고, 집열효율은 원추형 집광시스템의 집열효율 분석방법과 동일한 방법으로 분석하였다. Figure 3-3은 단일 모듈의 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능실험 설비 나타내고 있으며, Figure 3-4은 단일 모듈의 원추형 태양광-열 복합집광기 4개를 통합하여, 다 모듈의 원추형 태양광-열 복합시스템으로 구성된 성능실험 설비를 나타내고 있다.



Figure 3-3. Experimental setup of single module CPV/T conical system.

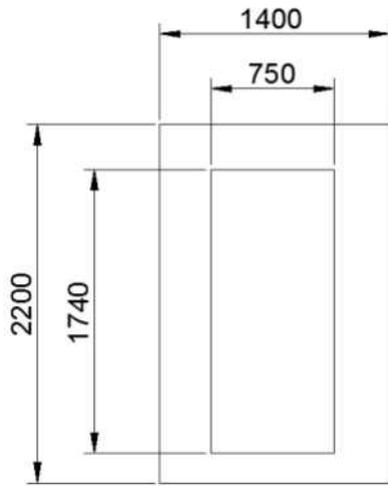


Figure 3-4. Experimental setup of multi module CPV/T conical system.

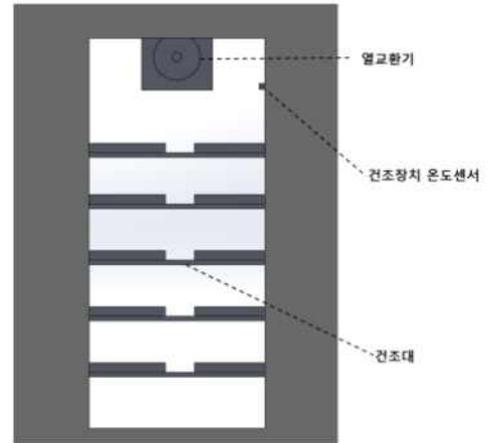
## 제 4 절 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치

### 1. 건조장치

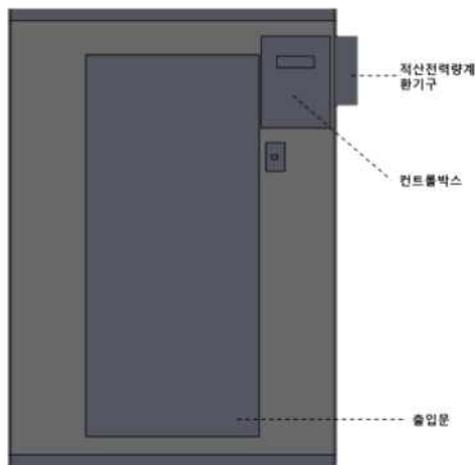
본 연구에서 제작된 건조장치는 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템에 의해 가열된 축열조 내의 열매체를 건조 열원으로 사용하며, 태양에너지에 의한 열원이 부족할 경우 축열조 내의 보조열원인 전기히터를 가동하게 된다. 보조열원인 전기히터는 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템에 의해 생산된 전기에 의해 가동하게 된다. 건조실은 1400×1400×2200mm(L×W×H)의 크기이고, 건조실 내부에는 5단의 건조대가 설비되어 있다. 건조실의 외벽은 단열효과가 우수한 100mm의 폴리우레탄 판넬을 이용하여 제작하였다. 건조장치의 구조는 Figure 4-1과 같다.



(a) Details of dimension



(b) In dryer model



(c) Outside the dryer model

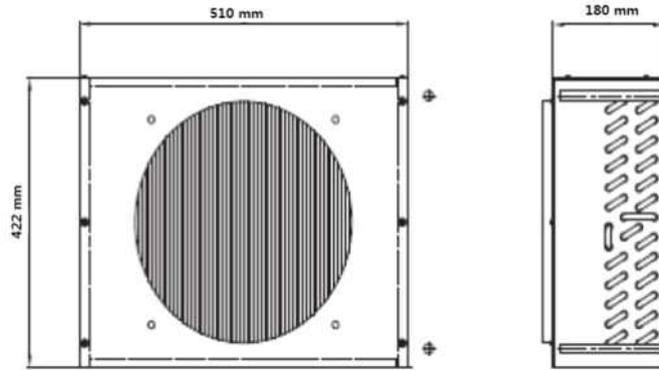


(d) Image of dryer

Figure 4-1. Agricultural dryer.

## 2. 열교환기

건조실 상부에 설비된 열교환기(CC-I015)는 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광 시스템과 보조열원에 의해 가열된 축열조 내의 열매체를 열교환기 내로 순환시켜 건조실 내의 건조공기를 가열한다. 가열된 건조공기는 열교환기 전면에 위치한 모터에 의해 작동하는 팬에 의해 건조장치 내를 순환한다(Figure 4-2, Table 4-1).



(a) Details of dimension



(b) Image of heat exchanger

Figure 4-2. Heat exchanger.

Table 4-1 Specifications of heat exchanger

Items	Specifications
Model	CC-I015
Horse power (hp)	2
Heating surface area (m <sup>2</sup> )	143
Fin pitch (mm)	2.5
Fan (mm)	350
Motor power (W)	66

### 3. 열매체 순환 제어장치

본 연구에서 사용된 열매체 순환을 위한 제어장치는 Figures 4-3, 4-4와 같다. 1차적으로 건조장치 내 온도(DT)가 컨트롤러 설정온도(ST)보다 낮아지면 솔레노이드

드 밸브(HPW-154)가 작동하게 되어 열교환기로의 열매체 유입을 가능하게 한다. 이때 축열조 내 열매체 온도(WT)가 온도조절리미트 설정온도에 도달해야만 건조장치 사이에 있는 순환펌프를 작동시켜 열교환기로의 열매체 유입이 시작되도록 구성하였다. 제원은 Table 4-2, 4-3과 같다.



Figure 4-3. Control device for circulating of heat medium.      Figure 4-4. Solenoid valve.

Table 4-2 Specifications of control device for circulating of heat medium

Items	Specifications
Model	TS-120S
Max. temperature (°C)	120
Rated current (A)	20
Rated voltage (V)	250
Switch circuit	Single Pole Double Throw (SPDT)
Weight (g)	75
Capillary tube	Stainless
Length (mm)	1000
Knob type	R type

Table 4-3 Specifications solenoid valve

Items	Specifications
Fluid	Water
Fluid temp. (°C)	0 ~ 60
Ambient temp. (°C)	50
Pressure range (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.1 ~ 10
Insulation grade	Class B
Electrical conn.	Lead wire
End conn.	PT(RC) 1/2"
Orifice size (mm)	Ø15

#### 4. 온·습도 측정

본 연구의 건조장치 내 데이터 측정을 위해 온·습도계(SL-173, SELCO, CHINA)를 사용하였다 (Figure 4-5, Table 4-4). 온·습도계는 건조장치 내 온도측정 센서와 각각의 트레이의 상단부에 위치하여 실시간으로 데이터를 측정하였다.



Figure 4-5. Thermo-hygrometer.

Table 4-4 Specifications of thermo-hygrometer

Items	Specifications	
Model	SL-173	
Measurable range	Temperature (°C)	-30 ~ 85
	Humidity (%RH)	0 ~ 100
Accuracy	Temperature (°C)	±0.5
	Humidity (%RH)	±3
Resolution	Temperature (°C)	0.1
	Humidity (%RH)	0.1
Logging rate (s)	2 ~ 86400	
Data memory	43000	
Size (mm)	125 × 28 × 22	
Wight (g)	60	
Waterproof grade	IP67	

## 5. 제어기 구성

### 가. 제어방법

본 연구에서 농산물 건조장치의 건조온도 제어를 위해 제어장치(FOX-2001, 대성 E.N.G, KOREA), 마그네틱 스위치, 누전차단기, 작동 램프, 온도 릴레이, 타이머 릴레이, 디지털온도보상수정발진기(DTCXO) 등으로 구성되었다. 또한, 마그네틱 스위치를 사용하여 순환펌프, 건조장치 내 히터, 팬 모터, 솔레노이드 밸브를 제어하였다. 다음 설비 회로의 결선은 Figure 4-6과 같다.

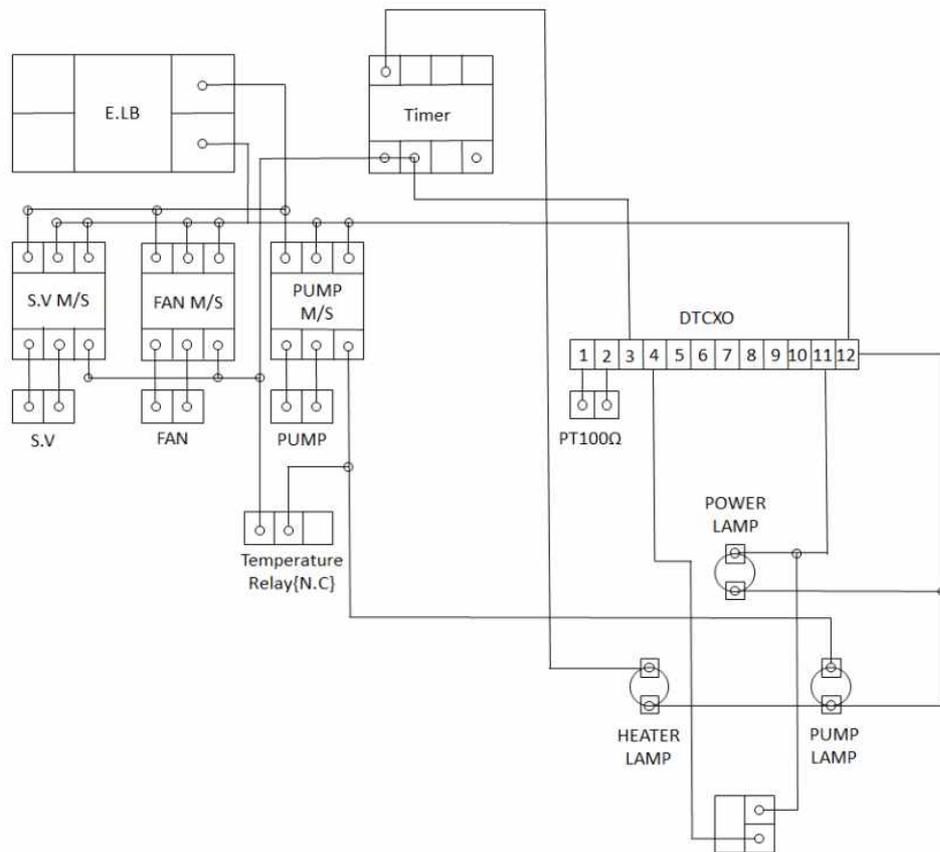


Figure 4-6. Schematic diagram of dryer for control.

## 나. 제어동작

본 연구에서 농산물 건조장치의 제어를 위해 건조장치 내 위치한 온도센서와 컨트롤박스의 설정온도, 축열조 내 열매체의 온도를 비교하여 작동하게 된다. 건조장치 내 제어기의 동작 흐름은 Figure 4-7과 같다. 사용자가 설정한 온도(ST)와 건조장치 내부에 설치된 온도 검출 센서(DT), 온도 유지 범위를 위한 설정값(R), 축열조 내 온도 검출 센서(WT)가 각각의 변수로 작용하였다. 사용자가 해당 농산물의 적정 건조온도와 온도 유지 범위를 설정하면 송풍기가 연속적으로 작동하게 된다. 다음, 설정온도와 건조장치 내 온도를 비교하여 설정온도가 높은 경우와 설정온도가 낮은 경우로 작동하여 Figure 4-7의 과정을 반복적으로 수행하게 된다.

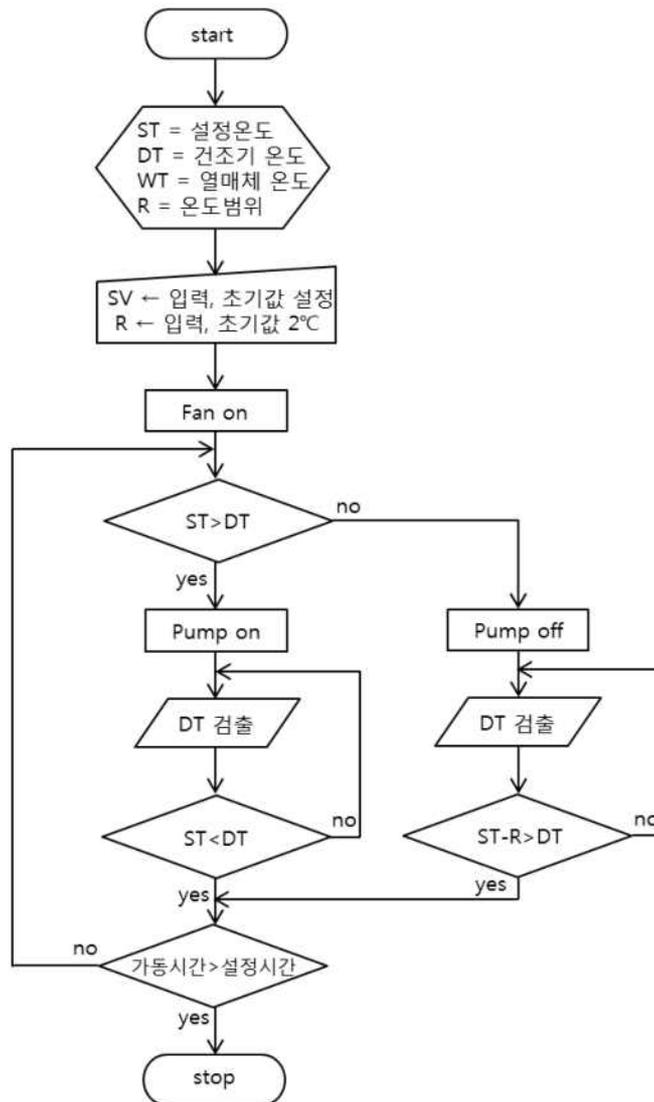


Figure 4-7. Control flow graph of dryer.

## 6. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치 구성

본 연구에서 원추형 태양열 집광시스템에 의해 가열된 축열조 내 열매체가 설정 온도(70℃)에 도달하면 열매체 순환 제어장치의 온도센서로 열매체의 온도를 감지하여 순환펌프와 솔레노이드 밸브의 ON/OFF 작동을 한다. 축열조 내의 열매체 온도가 설정 온도에 도달하면 순환펌프와 솔레노이드 밸브가 작동하여 가열된 열매체는 건조장치의 상부에 위치한 열교환기 내를 순환하면서 건조실 내의 건조공기 온도를 상승시키고, 건조실 내의 건조공기 온도가 설정온도에 도달하면 작동이 멈추게 된다. 본 연구에서 개발된 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 건조장치는 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템과 보조열원 일체형 축열조 및 건조실 등으로 구성되어있다 (Figure 4-8, Table 4-5). 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치의 개략도는 Figure 4-9와 같다. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 열매체 및 축열매체 순환 계통도는 Figure 4-10과 같다.



Figure 4-8. Experimental setup of dryer using conical solar concentrating system.

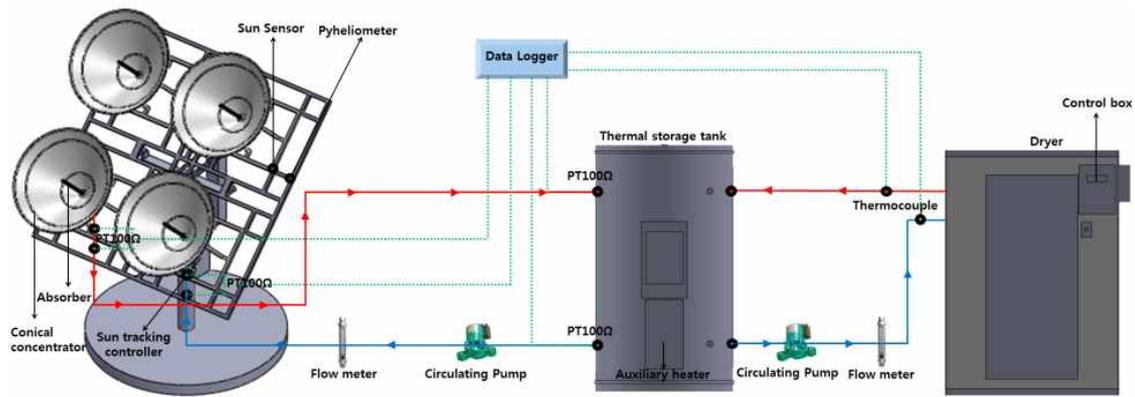


Figure 4-9. Schematic diagram of conical solar concentrating system.

Table 4-5 Specifications of dryer using conical solar concentrating system

Items	Specifications
<b>Part I</b>	
Solar concentrator	Conical solar concentrator
Reflector material	Aluminium
Absorber	Double tube absorber
Solar tracking system	Dual axis
Flow meter model	PA-601
Circulating pump model	PH-045M
Collecting area (m <sup>2</sup> )	0.785 × 4
Thermal storage tank capacity (L)	500
<b>Part II</b>	
Dryer size (mm)	1400 × 1400 × 2200
Heat exchanger	CC-I015
Motor	
Plyurethane panels (mm)	100
Flow meter model	PA-601
Circulating pump model	PH-045M

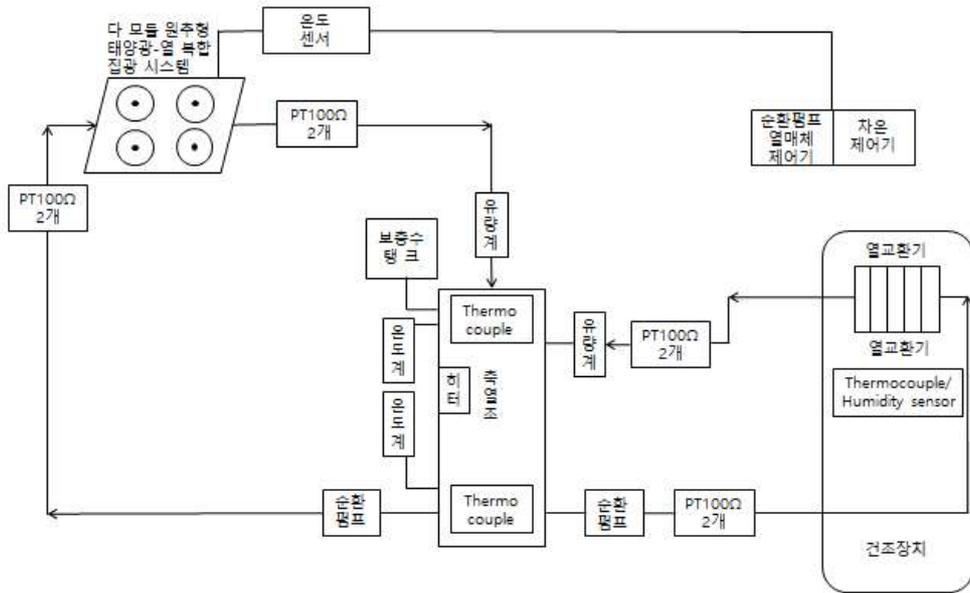


Figure 4-10. Circulation diagram for heating medium of CPV/T system..

## 7. 에너지 자립형 건조시스템 구축

### (1) 태양광 발전 부대설비

#### (가) 충전 컨트롤러

단락, 과전압, 과전류 및 고온 등으로부터 전기적인 보호가 가능하고 축전지의 효율적인 충전을 위해 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템과 축전지 사이에 충전 컨트롤러를 설치하였다. 설비된 충전 컨트롤러의 사양은 Table 4-6과 같으며 실물 사진은 Figure 4-11과 같다.

Table 4-6 Specifications of charging controller

Model		TS-MPPT-60
Maximum Battery Current		45amps~60amps
Peak Efficiency		99%
Nominal System Voltage		12, 24, 36 or 46 volts DC
Max. Solar open Circuit Voltage		150 volts DC
Battery Operating Voltage Range		8-72 volts DC
Maximum Self-consumption		4 Watts
Transient Surge Protection		4500 Watts/port
Charging algorithm		4-stage
Temperature Compensation	Coefficient	-5mV/°C/cell(25°ref)
	Range	-30°C to +80°C
Dimensions		291mm×130mm×142mm
Weight		4.2kg



Figure 4-11. Charging controller.

(나) 축전지

본 실험에 사용된 축전지는 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템에서 생산된 전기를 저장하고, 필요할 때 사용하기 위해 사용하기 위한 것이다. 축전지의 전압과 용량은 각 12V와 200Ah의 용량을 가지고 있다. 그러나 본 실험에서 사용되는 필요 축전지의 전압과 용량은 24V와 800Ah이므로 2개씩 직렬로 연결하여 24V를 만들었고 24V의 축전지 4쌍을 다시 병렬로 연결하여 800Ah의 용량을 만들었다. 축전지 설비 공간에 알루미늄 프로파일을 이용해 2층의 틀을 제작하여 아래위 4개씩 총 8개의 축전지를 설비하였다. 축전지의 제원은 Table 4-7과 같으며 실물은 Figure 4-12과 같다.

Table 4-7 Specifications of battery

모델명	전압	용량(Ah)	R.C분	외형치수			중량(kg)
		20HR	25AMP	길이(L)	넓이(W)	높이(h)	
SB 2000	12V	200	414	509	274	218	54.7



Figure 4-12. Batteries for storage of photovoltaic electricity.

(다) 인버터

다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템에서 생산된 전기를 교류로 변환하여 사용하기 위해서 필수적인 제품인 태양광 발전용 인버터를 설치하였다. 복합시스템에서 직류전류가 생산되면 축전지에 저장되고 인버터를 통하여 교류전류로 변환하여 이용할 수 있게 하는 장치이다. 인버터를 통하여 교류계통으로 접속된 태양추적장치, 보조열원 및 부대설비에 전력을 공급하는데 이용된다. 인버터의 제원은 Table 4-8 과 같으며, 실물은 Figure 4-13와 같다.

Table 4-8 Specifications of inverter

모델명	입력전압	출력전압	최대출력	정격	무부하전류	외관규격(mm)
KE-16024B	DC24V	AC220V	1600W	1100W	370mA	220×72×290



Figure 4-13. Inverter.

(라) 전력량계

다 모듈 태양광-열 복합시스템으로부터 생산된 DC 전력을 확인할 수 있도록 충전컨트롤러와 축전지 사이에 그림 Figure 4-14(a)와 같이 DC 전력량계(WK1, ㈜웰케이원, 한국)를 설치하였고, 제원은 Table 4-9와 같다.

AC 전력량계는 복합시스템으로부터 생산된 전기의 사용량을 측정하기 위해 축전지의 DC를 AC로 변환하는 인버터 다음에 하나 설치되었고, 복합시스템으로 생산된 전력이 부족할 경우를 대비한 한전계통으로부터 사용된 전기량을 측정하기 위해 AC 전력량계가 또 하나 설비되었다(Figure 4-14(b)). 또한 한전 전기 및 복합시스템으로부터 생산된 전기의 총 사용량을 측정하기 위해 AC 전력량계가 추가적으로 설비되었으며, 제원은 Table 4-10과 같다.



(a) DC electricity meter



(b) AC electricity meter

Figure 4-14 Electricity meter.

Table 4-9 Specifications of DC electricity meter

모델명	WK1
제조사	(주) 월케이원
구동 전압	12V
ADC RESOLUTION	12bit
측정 프로세서	82G516 Megawin
최대입력 전압	35V
최소입력 전압	15V
최대측정전류	100A
최대측정전력	999MW

Table 4-10 Specifications of AC electricity meter

모델명	LD1210DR-040(상하)	
상선식	단상 2선(1P2W)	
전류(A)	40(10)	
전압(V)	220V, 60Hz	
계기정수(pulse/kWh)	1000	
정밀도	1.0급	
Option	S	표준형
	P	펄스형
	R	원격검침형

(마) 전기 계통도

다 모듈 태양광-열 복합시스템의 전기 계통도는 Figure 4-15와 같다. 전기 계통도에서와 같이 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템으로 부터 공급되는 전기 생산 전력이 부족할 경우에 한전으로부터 공급되는 전기를 이용할 수 있게 계통연계 하였다. 다 모듈 태양광-열 복합시스템에 의하여 생산된 전력은 충전컨트롤러를 통하여 과전압, 과전류 등의 불안전상태 없이 축전지에 안정적으로 충전 할 수 있도록 해준다. 이때, 충전컨트롤러와 축전지 사이에 태양광-열 복합시스템으로부터 생산된 DC 전력을 확인할 수 있도록 DC 전력량계를 설치하였다.

축전지에 저장된 DC 전력은 인버터를 통하여 AC 전력으로 변환 되며, 셀렉트 스위치를 통해 복합시스템의 전기가 부족할 경우 한전 전력을 이용하게 되고 AC전력량계를 거쳐 태양추적장치, 펌프, 축열조의 보조열원 공급을 위해 사용된다. 여기서, 셀렉트 스위치는 축전지에 저장된 전기의량을 기준으로 일정량 이상이면 태양열광-복합시스템에서 생산된 전기를 사용하고 부족할 경우 한전으로부터 공급되는 전기를 사용하게 된다.

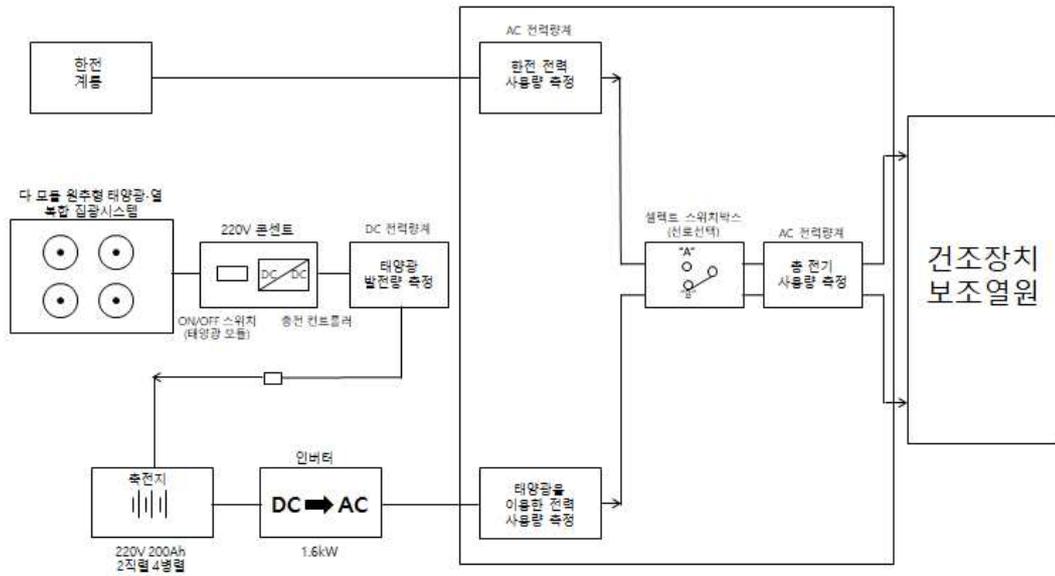


Figure 4-15. Electricity diagram of conical CPV/T system.

## 7. 농산물 건조특성 분석

농산물 건조는 농산물의 변질을 방지하고 저장성과 가공성을 향상시키기 위하여 농산물의 수분을 제거한다. 농산물의 함수율은 건량기준(Dry basis) 백분율과 습량 기준(Wet basis) 백분율로 표시하며, 식 (4-1), (4-2)로 나타낸다.

$$\text{습량기준 함수율 } m = \frac{W_m}{W_t} \times 100 = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100 \quad (4-1)$$

$$\text{건량기준 함수율 } M = \frac{W_m}{W_d} \times 100 = \frac{100m}{100 - m} \quad (4-2)$$

여기서,

$m$  = 습량기준 함수율(%)

$W_m$  = 물질 내에 포함되어 있는 수분의 무게(g)

$W_t$  = 물질의 총 무게(g)

$W_d$  = 완전히 건조된 물질의 무게;건물량 (g)

$M$  = 건량기준 함수율(%)

식 (4-2)에서  $W_d$ 의 값은 물질 내 수분의 양에 관계없이 항상 일정하기 때문에 학술용에는 건량기준 함수율이 사용되며, 본 연구에서 농산물(애호박 및 당근 절편)의 초기함수율 측정 및 건조특성 분석을 위해 건량기준 함수율을 이용하였다.

## 제 5 절 결과 및 고찰

### 1. 원추형 집광시스템 성능분석

#### 가. 단일 모듈의 원추형 집광시스템 집열성능 분석결과

##### (1) 유량에 따른 집열효율 분석

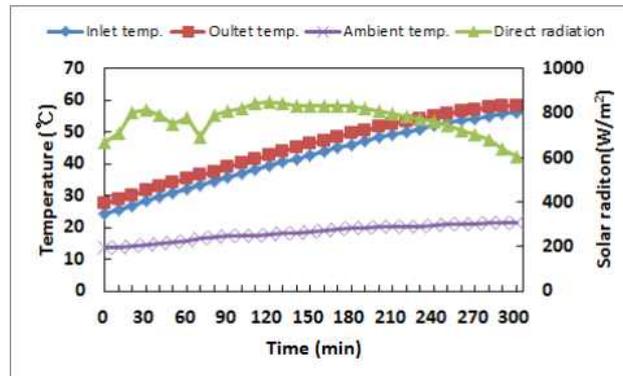
Figure 5-1은 동일한 대기온도 및 일사량 조건에서 단일 모듈의 원추형 집광기의 흡수기를 순환하는 유량이 2L/min, 4L/min, 6L/min 일 때 실험기간 5시간동안 흡수기 출구와 입구에서의 열매체 온도차를 나타낸 그림이다. 대체로 유량이 낮을 때 흡수기 입·출구에서의 열매체 온도차는 높게 나타났고, 유량이 클 때는 열매체 온도차가 낮게 나타났다. 실험기간 동안 유량 2L/min, 4L/min, 6L/min에서 흡수기 내 입·출구에의 열매체 온도차는 각각 2 ~ 4℃, 1.5 ~ 2℃, 1 ~ 1.5℃ 정도에서 변하는 것으로 나타났다.

Figure 5-2는 직달일사량의 변화와 흡수기 입·출구의 열매체 온도차, 그리고 실험기간 동안 집열된 에너지의 변화를 나타내고 있으며, 직달일사량의 변화가 흡수기 입·출구의 열매체 온도차로 나타나고 그 결과에 따라 집열된 에너지도 같은 추세로 변화되는 것을 나타낸다. 실험기간 동안 유량 2L/min, 4L/min, 6L/min에서 집열된 평균 에너지는 각각 425.0W/m<sup>2</sup>, 485.2W/m<sup>2</sup>, 448.2W/m<sup>2</sup>인 것으로 나타나, 유량 4L/min에서 가장 집열이 잘 되는 것으로 분석되었다.

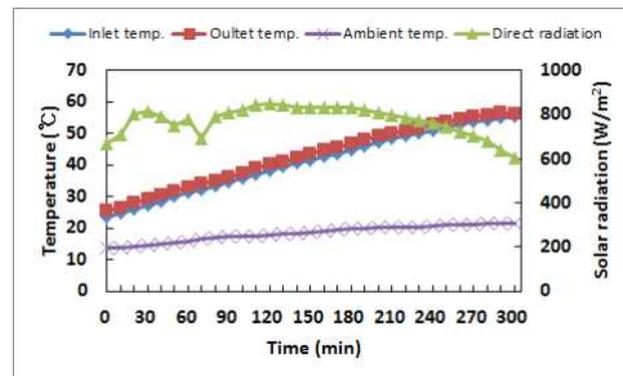
Figure 5-3은 원추형 집광기의 흡수기를 순환하는 유량에 따른 집열효율을 분석한 결과이다. 유량이 2L/min, 4L/min, 6L/min 일 때 모든 유량에 대해 열매체 온도가 증가하면서 효율이 감소하는 것은 대기온도와의 차이가 증가함으로 인해 대류 열손실도 함께 증가하여 효율이 감소하는 것으로 이런 현상은 일반적인 집열기의 기본 특성이며, 본 시스템도 같은 특성을 보여준다. 집열효율 방정식의 기울기가 유량 2L/min에서 가장 크고, 다음은 유량 6L/min에서 크게 나타났으며, 유량 4L/min이 가장 작은 기울기를 나타냈다. 이러한 결과는 4L/min의 유량에서 열매체 온도가 상승하더라도 주위로의 열 손실이 비교적 작다는 것을 의미한다.

Table 5-1은 유량별 최고, 초소, 평균 집열효율을 분석하여 나타낸 표이다. 유량 2L/min, 4L/min, 6L/min에서 최고 및 최소의 집열효율은 각각 78% 및 69.1%, 84.79% 및 78.0%, 81.04 및 76%로 나타났고, 평균 집열효율은 유량 2L/min, 4L/min, 6L/min에서 각각 73.6%, 81.4%, 78.5%로 나타났다. 따라서 유량 4L/min에

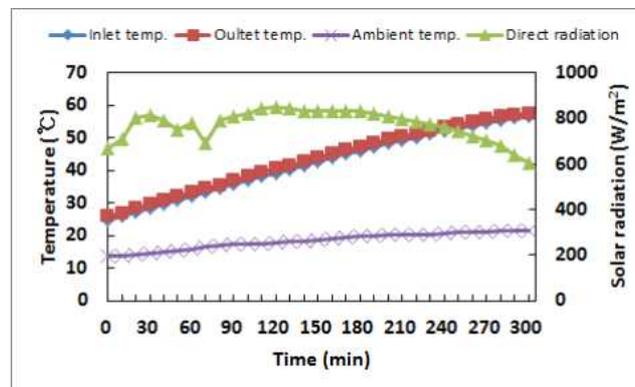
서 가장 높은 최고, 최저 및 평균 집열효율을 나타냈다. 대부분의 태양열 집열기는 유량이 증가하면서 태양 복사열 흡수율이 높아져 집열기 효율도 증가하지만 대류 열손실도 함께 증가하기 때문에 흡수율과 손실율의 경계점인 임계유량이 존재하며, 본 원추형 집광시스템에서는 유량 4L/min이 가장 집열효율이 좋은 임계 유량임을 확인 할 수 있었다.



(a) 2L/min

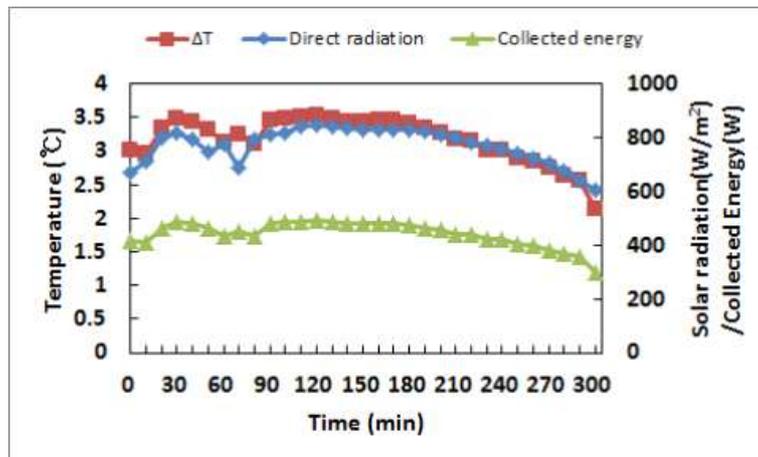


(b) 4L/min

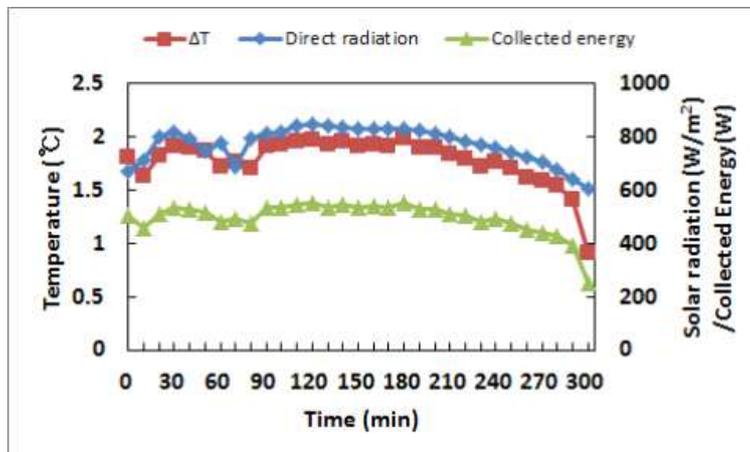


(c) 6 L/min

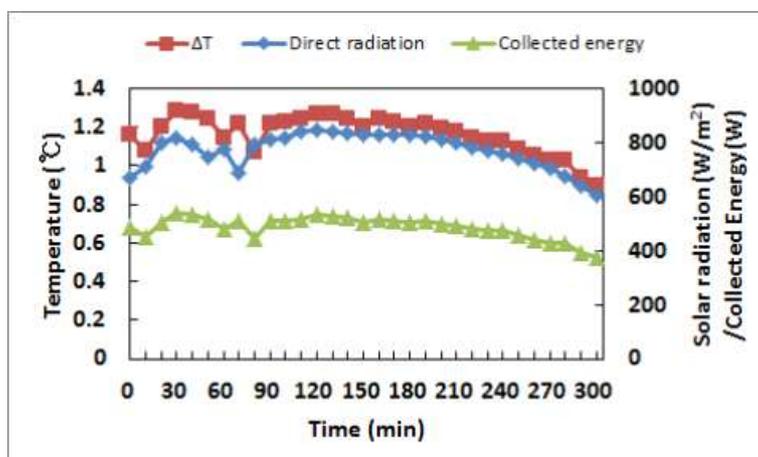
Figure 5-1. Ambient temperature, inlet and outlet temperatures of absorber, and direct radiation with different flow rate.



(a) 2L/min



(b) 4L/min



(c) 6 L/min

Figure 5-2. Ambient temperature, inlet and outlet temperatures of absorber, and direct radiation with different flow rate.

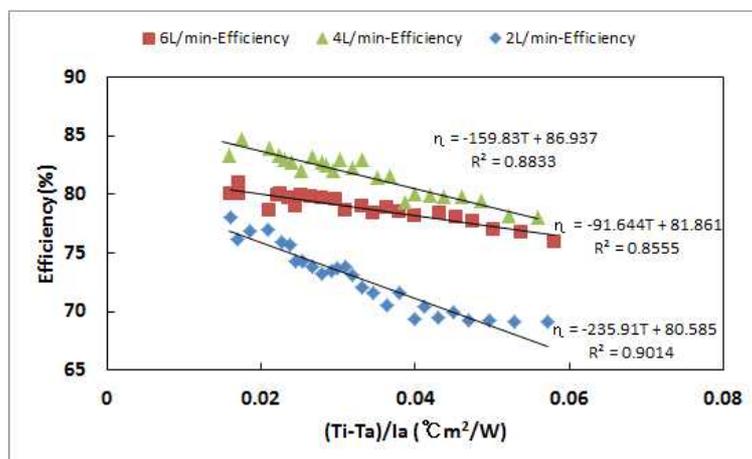
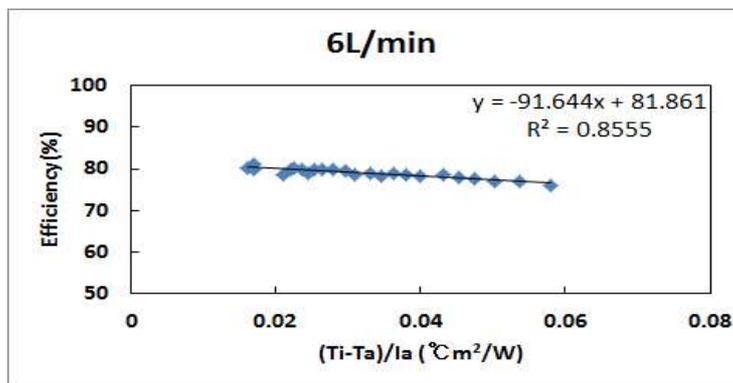
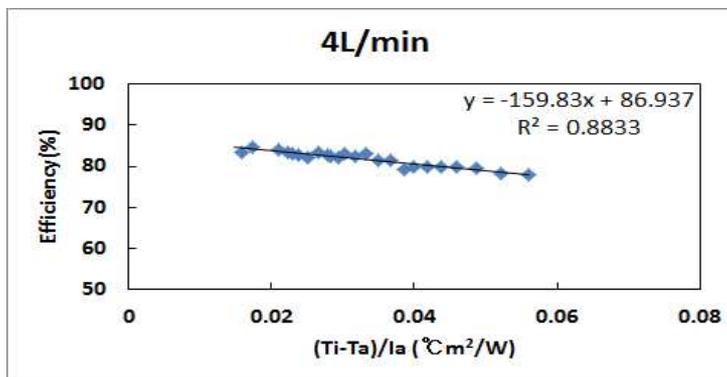
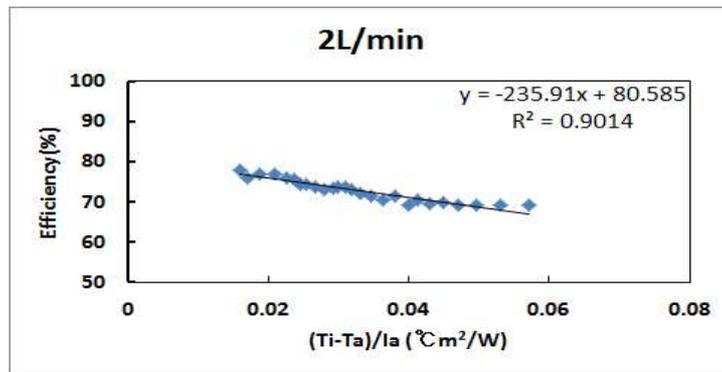


Figure 5-3. Collecting efficiency of conical solar collector with different flow rate.

Table 5-1 Solar collecting efficiency with different flow rate

Flow rate Collecting Efficiency	2L/min	4L/min	6L/min
Maximum Efficiency(%)	78.0	84.79	81.04
Minimum Efficiency(%)	69.1	78	76
Average Efficiency(%)	73.6	81.4	78.5

(2) 소형 축열조 성능분석

축열조 내의 물과 원통 내부의 대류열전달 계수  $h_{\infty 1}$ 의 평균값은  $12.69 W/m^2K$ 로 나타났으며, 축열조 외 표면과 외부 공기와의 대류열전달계수  $h_{\infty 2}$ 의 평균값은  $2.45 W/m^2K$ 로 나타났다. Figure 5-4에 나타낸 바와 같이 시간에 따른 축열조 내 물의 온도 측정치와 반 실험적 방법에 의해 예측된 축열조 물의 온도는 거의 같은 것으로 나타났다. 또한 일사량이 낮아지면서 축열조 물의 외부로의 열손실이 점차 커지는 것을 알 수 있으며, 2시간 20분의 시간 경과 동안 축열조 내 물의 온도는  $3.5^{\circ}C$  정도 낮아지는 것으로 분석되었다. 그러나 일사량이 낮아지는 정도에 비해 축열조 내 물의 온도 저감 정도는 다소 낮은 것으로 나타났다. 축열조 내 물의 온도는 Figure 5-5와 같이 일사량뿐만 아니라 외기 온도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 외기 온도가 낮아짐에 따라 축열조 내 물의 온도는 점차 낮아졌으나, 외기 온도의 하강 정도에 비해 축열조 내 물의 온도 하강 정도가 큰 것으로 나타났다. 이는 일사량이 시간에 따라 크게 낮아져 축열조 내 물의 열손실이 일사량과 외기온도 변화에 크게 영향을 받았기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구결과에 따라 외기온도와 일사량의 변화에 따른 축열조 내 열매체 온도의 변화를 최소화하기 위한 축열조 외부의 추가적 단열의 필요성이 제시되었다.

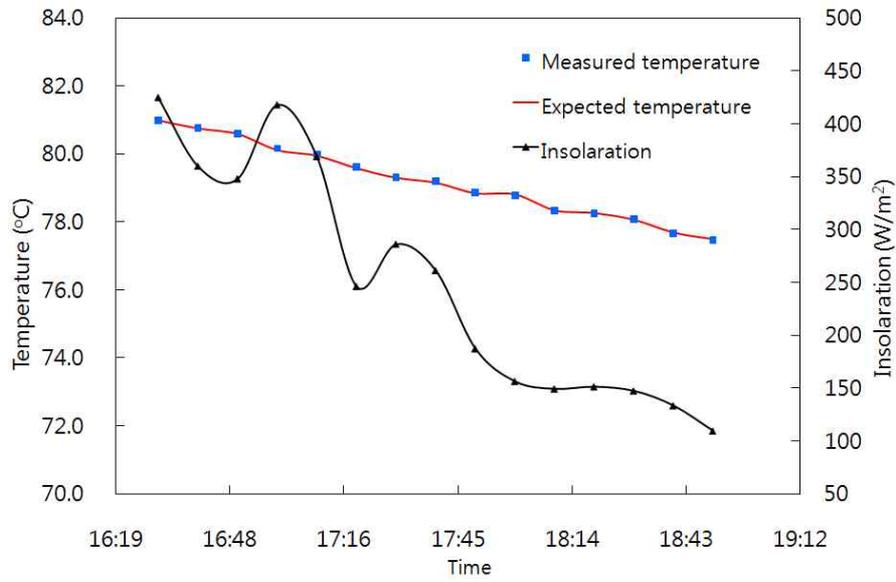


Figure 5-4. Comparison of expected and measured temperatures of heating medium inside storage tank with the change of solar radiation.

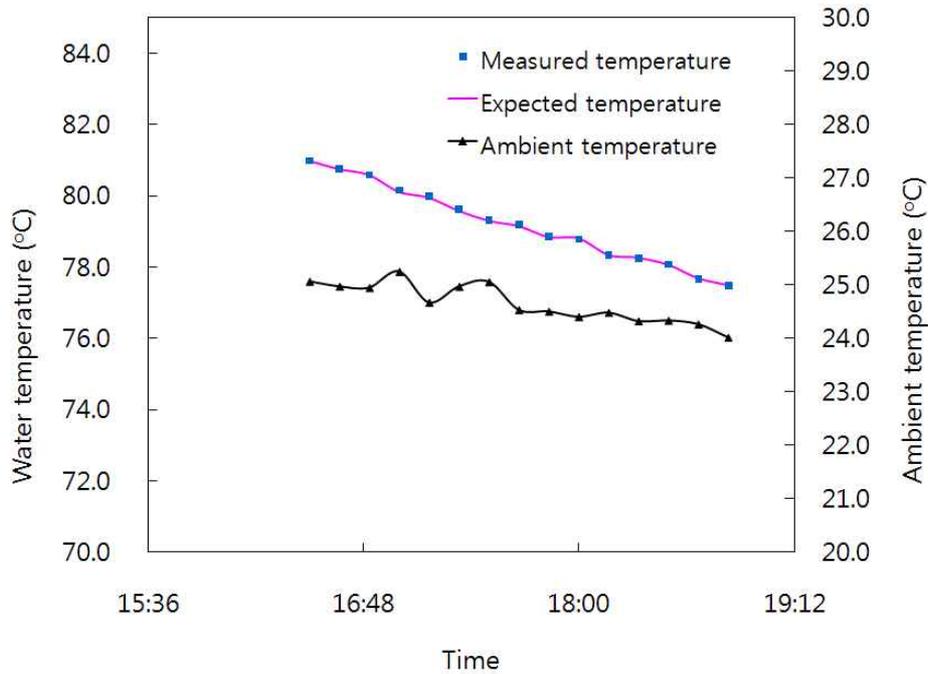


Figure 5-5. Comparison of expected and measured temperatures of heating medium inside storage tank with the change of ambient temperature.

### (3) 원추형 집광기의 흡수관 CFD 해석

#### (가) 흡수관 내 열매체 유속분포 분석

원추형 집광기의 흡수관 내에 순환되는 열매체 유속분포를 유량이 각각 2L/min, 4L/min, 6L/min 일 때 CFD 해석에 의해 분석하였다. 흡수기 내로의 순환유량이 높아지면 흡수관 내 열매체 유속은 빨라지는 것으로 나타났고, 유량 2L/min에서 약 0.3128m/s, 유량 4L/min 일 때 약 0.6256m/s, 유량 6L/min에서 약 0.9385 m/s로 분석되었다(Figure 5-6). 또한 흡수기 출구 쪽에서의 열매체 유속은 약 1.1m/s 정도로 흡수관 내의 다른 위치에 비해 비교적 크게 나타났다.

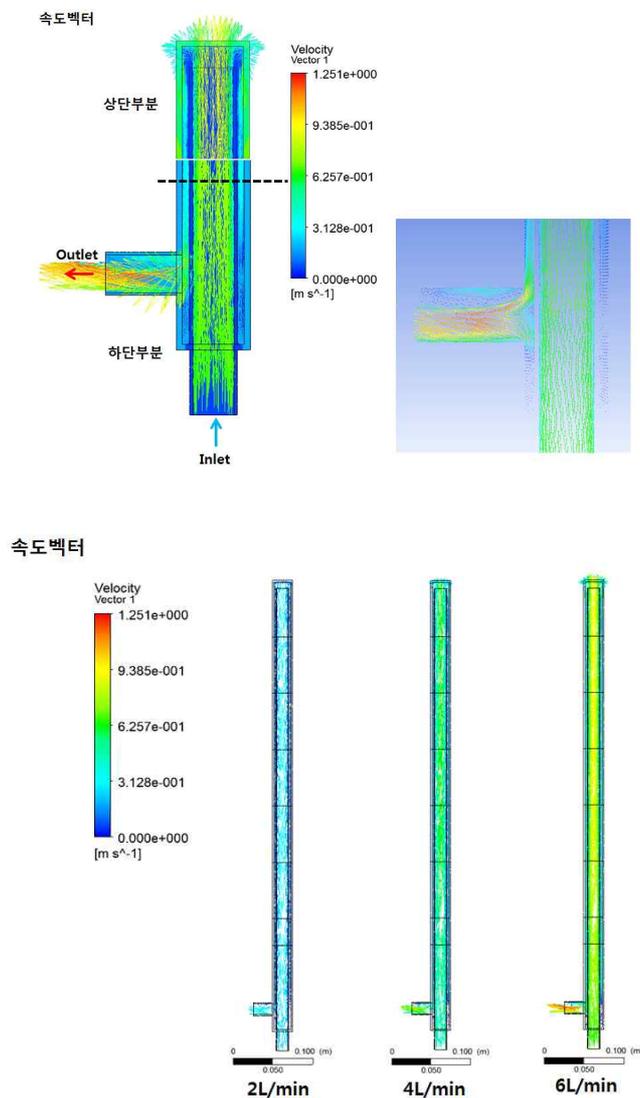


Figure 5-6 Velocity distribution of heating medium inside absorber.

(나) 흡수관 표면 및 열매체 온도분포 분석

원추형 집광기의 흡수관 내에 순환되는 열매체 온도분포는 유량이 각각 2L/min, 4L/min, 6L/min 일 때 큰 차이 없이, 20 ~ 21°C인 것으로 나타났으며, 이때 흡수관 표면의 온도는 상단부가 약 27.8°C로 하단부의 25.5°C보다 다소 높은 것으로 나타났다(Figure 5-7). 이러한 결과는 흡수기 상단부의 집광비가 하단부보다 크기 때문에 상단부에 집광되는 태양광의 강도가 하단부에 비해 크기 때문에 상단부 흡수기 표면의 온도가 다소 높아진 결과로 분석되었다.

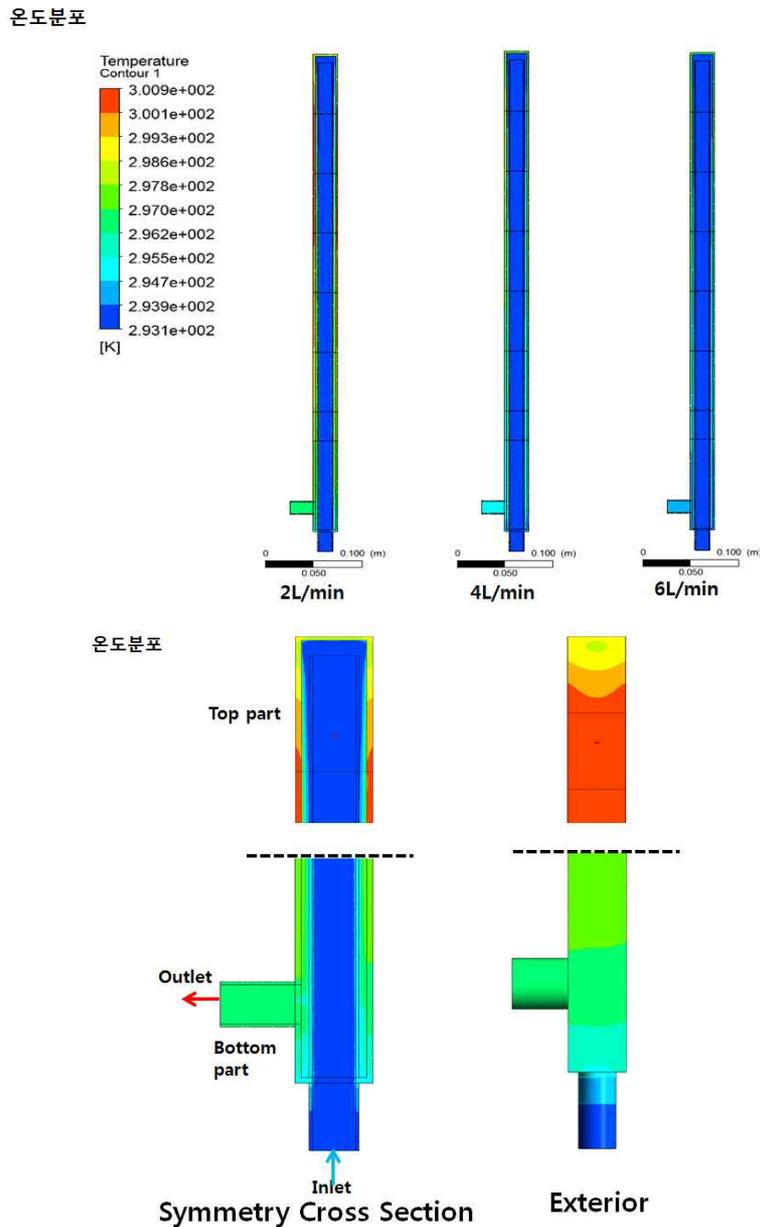


Figure 5-7. Temperature distribution of absorber surface and heating medium inside absorber.

나. 다 모듈 원추형 집광시스템 집열성능 분석결과

다 모듈 원추형 집광시스템 성능실험은 집열효율에 중요한 영향을 미치는 요소 중 하나인 열매체의 순환유량을 3L/min, 4L/min, 5L/min, 6L/min으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 실험은 강원대학교 농업생명과학대학교 1호관 옥상(위도:37°52', 경도:127°44')에서 진행되었다. 실험에 사용된 축열조 내 열매체의 용량은 500L이며 열매체로 물을 사용하였다. 열매체의 초기온도는 18.02℃ ~ 28.08℃로 설정하였다. 또한, 성능실험을 위해 열매체의 입·출구에 각각 두 개씩의 측온저항체(RTD)를 설치하여 정확한 온도를 산출하였다. 각 유량별 실험조건은 Table 5-2와 같다.

Table 5-2 Experimental environmental conditions of the flow rates

Flow rates	Inlet temp. (℃)	Ambient temp. (℃)	Direct solar radiation (W/m <sup>2</sup> )
3L/min	24.06 ~ 47.79	18.4 ~ 23.7	659.1 ~ 868.3
4L/min	28.08 ~ 48.97	22.9 ~ 27.7	625.6 ~ 880.3
5L/min	18.02 ~ 38.50	17.5 ~ 22.7	766.1 ~ 868.3
6L/min	23.20 ~ 42.22	19.9 ~ 23.8	579.9 ~ 844.7

(1) 순환 유량에 따른 집열성능 분석

(가) 순환유량 3L/min에 대한 성능분석

다 모듈 원추형 집광시스템의 순환유체 유량 3L/min의 성능분석 실험은 360분 동안 진행되었으며, Figure 5-8에 성능분석을 위해 측정된 일사량, 외기온도 및 열매체의 입·출구 온도를 나타내었다. 열매체 입구의 온도는 24.06℃ ~ 47.79℃, 외기온도는 18.4℃ ~ 23.7℃, 일사량은 659.1W/m<sup>2</sup> ~ 868.3W/m<sup>2</sup>의 범위로 나타났다.

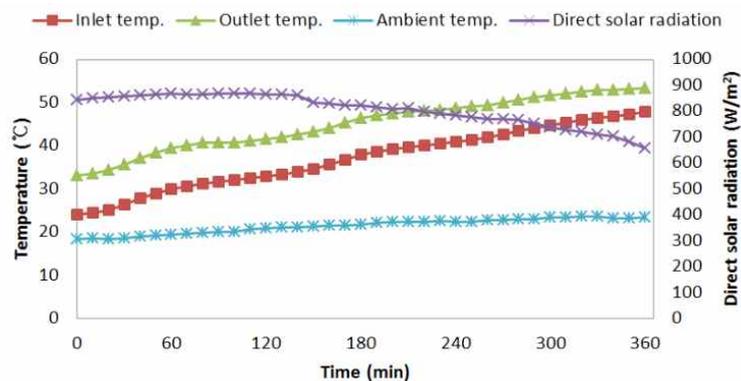


Figure 5-8 Operating conditions according to time of the flow rate of 3L/min.

원추형 태양열 집광시스템의  $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 집열효율 분석은 Figure 5-9와 같다. 집광시스템의 최고효율  $(T_r - T_a)/I_a = 0$  일 때 79.25%, 최저 효율 56.94%, 평균효율 68%로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 열매체 입구의 온도와 외기온도 차의 증가로 대류에 의한 열 손실이 커져 집열효율의 감소를 보였다.

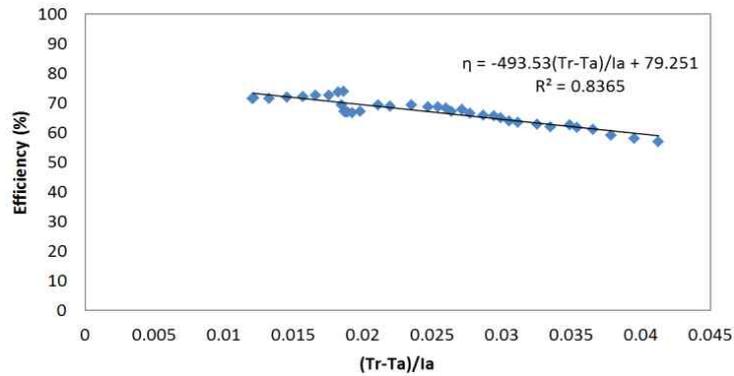


Figure 5-9 Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the flow rate of 3L/min.

(나) 순환유량 4L/min에 대한 성능분석

원추형 태양열 집광시스템의 순환유체 유량 4L/min의 성능분석을 수행하였다. 성능분석을 위한 실험은 360분 동안 진행되었으며, Figure 5-10에서 성능분석을 위해 측정된 일사량, 외기온도 및 열매체의 입·출구 온도를 나타내었다. 열매체 입구의 온도는 28.08°C ~ 48.97°C, 외기온도는 22.9°C ~ 27.7°C, 일사량은 625.6W/m<sup>2</sup> ~ 880.3W/m<sup>2</sup>의 범위로 나타났다.

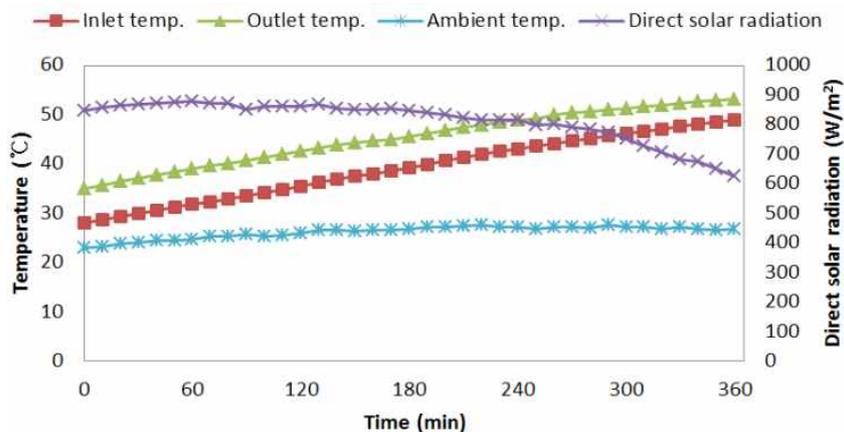


Figure 5-10. Operating conditions according to time of the flow rate of 4L/min.

원추형 태양열 집광시스템의  $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 집열효율 분석은 Figure 5-11과 같다. 집광시스템의 최고효율  $(T_r - T_a)/I_a = 0$  일 때 79.83%, 최저 효율 59.95%, 평균효율 70.00%로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 열매체 입구의 온도와 외기온도 차의 증가로 대류에 의한 열 손실이 커져 집열효율의 감소를 보였다.

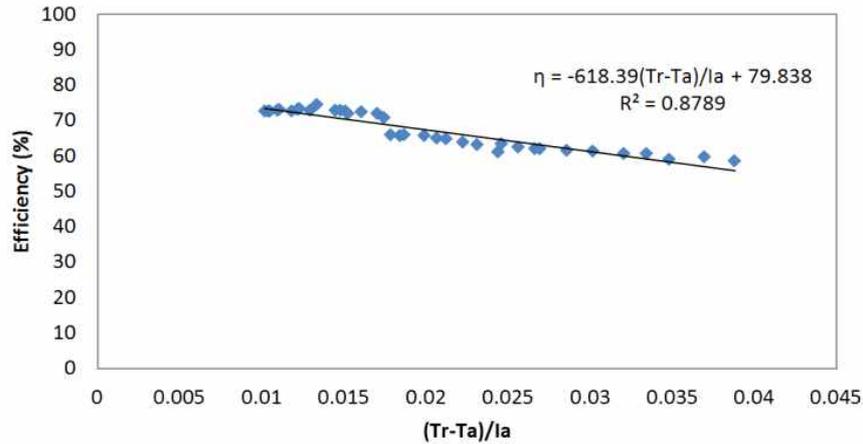


Figure 5-11. Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the flow rate of 4L/min.

(다) 순환유량 5L/min에 대한 성능분석

원추형 태양열 집광시스템의 순환유체 유량 5L/min의 성능분석을 위한 실험은 360분 동안 진행되었으며, Figure 5-12에서 성능분석을 위해 측정된 일사량, 외기온도 및 열매체의 입·출구 온도를 나타내었다. 열매체 입구의 온도는 18.02°C ~ 38.50°C, 외기온도는 17.5°C ~ 22.7°C, 일사량은 766.1W/m<sup>2</sup> ~ 868.3W/m<sup>2</sup>의 범위로 나타났다.

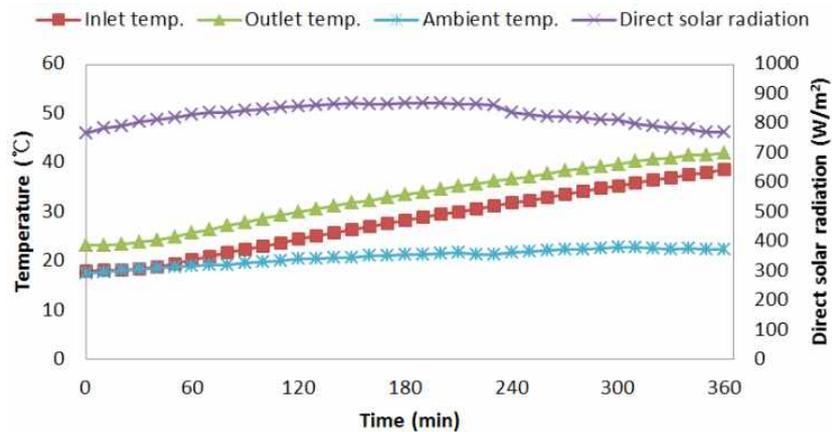


Figure 5-12. Operating conditions according to time of the flow rate of 5L/min.

원추형 태양열 집광시스템의  $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 집열효율 분석은 Figure 5-13과 같다. 집광시스템의 최고효율  $(T_r - T_a)/I_a = 0$  일 때 79.80%, 최저 효율 51.06%, 평균효율 66.70%로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 열매체 입구의 온도와 외기온도 차의 증가로 대류에 의한 열 손실이 커져 집열효율의 감소를 보였다.

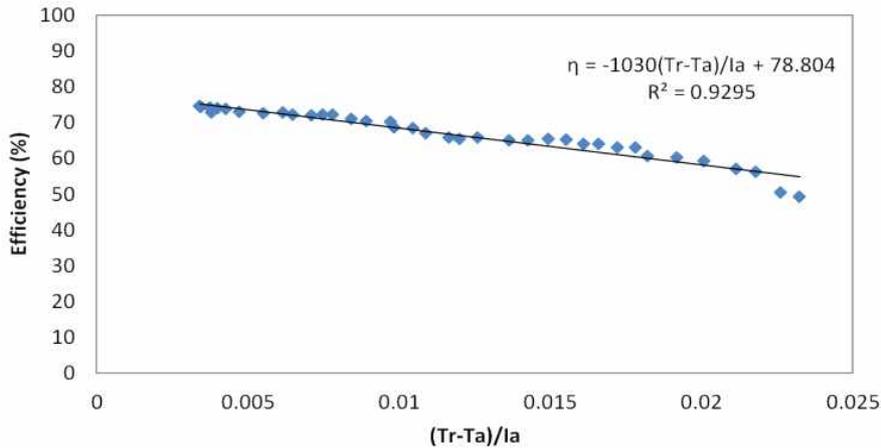


Figure 5-13. Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the flow rate of 5L/min.

(라) 순환유량 6L/min에 대한 성능분석

원추형 태양열 집광시스템의 순환유체 유량 6L/min의 성능분석을 수행하였다. 성능분석을 위한 실험은 360분 동안 진행되었으며, Figure 5-14에서 성능분석을 위해 측정된 일사량, 외기온도 및 열매체의 입·출구 온도를 나타내었다. 열매체 입구의 온도는 23.20°C ~ 42.22°C, 외기온도는 19.9°C ~ 23.8°C, 일사량은 579.9W/m<sup>2</sup> ~ 844.7W/m<sup>2</sup>의 범위로 나타났다.

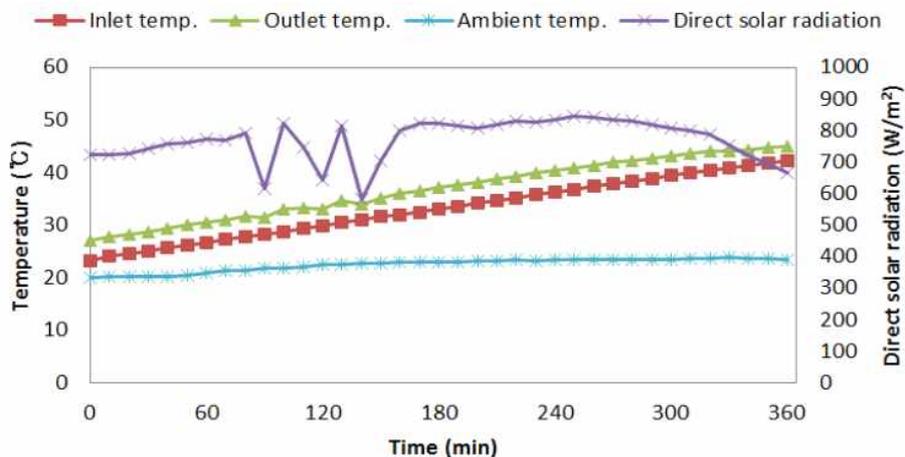


Figure 5-14. Operating conditions according to time of the flow rate of 6L/min.

원추형 태양열 집광시스템의  $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 집열효율 분석은 Figure 5-15와 같다. 집광시스템의 최고효율  $(T_r - T_a)/I_a = 0$  일 때 75.68%, 최저 효율 53.65%, 평균효율 65%로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 열매체 입구의 온도와 외기온도 차의 증가로 대류에 의한 열 손실이 커져 집열효율의 감소를 보였다.

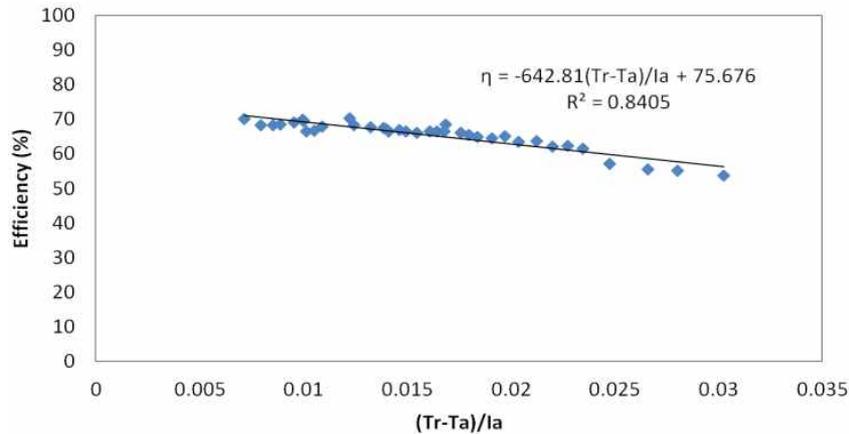


Figure 5-15. Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the flow rate of 6L/min.

(마) 원추형 태양열 집광시스템  $(T_r - T_a)/I_a$ 에 따른 유량별 집열효율 요약

가장 높은 집열효율을 갖는 순환유량을 위해  $(T_r - T_a)/I_a$ 에 따른 유량별 집열효율을 Figure 5-16, Table 5-3에서 나타냈다. 서로 다른 날 실시된 일일 실험임을 고려하여,  $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 일치되는 0.01 ~ 0.024 범위 내에서 비교분석하였다. 3, 4, 5, 6L/min의 평균효율은 각각 68.0%, 70.0%, 66.7%, 65.0%이다. 유량이 증가함에 따라 효율의 증가를 보이고 있으나, 일정 유량 이상이 되면 체류시간이 너무 짧아 충분한 열이 이중흡수기로 전달되지 않아 효율의 감소를 보인다. 또한, 일정 유량 이하가 되면 체류시간이 길어 열매체의 온도는 높아지나 외기온도와의 열 손실 증가로 효율의 감소를 보인다. 본 실험에서는 4L/min일 때 최대효율을 가졌다.

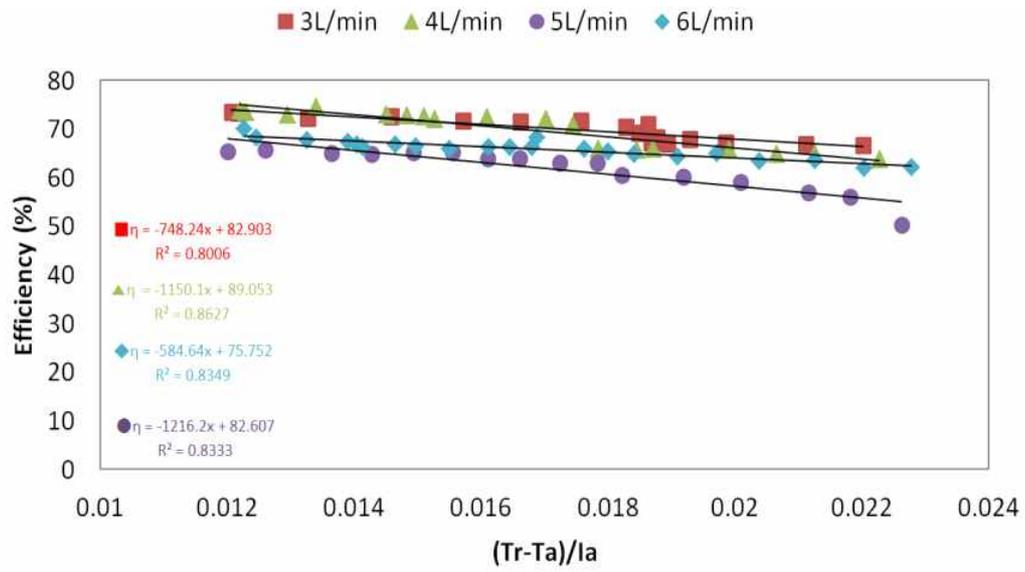


Figure 5-16. Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the flow rates.

Table 5-3 Experimental results for the different flow rates

Description	3L/min	4L/min	5L/min	6L/min	
Efficiency	Max. (%)	79.25	79.83	79.80	75.68
	Min. (%)	56.94	59.95	51.06	53.65
	Ave. (%)	68.0	70.0	66.7	65.00
R-square	0.8006	0.8627	0.8349	0.8333	
Trend line	$\eta = -748.24(T_r - T_a)/I_a + 82.903$	$\eta = -1150.1(T_r - T_a)/I_a + 89.053$	$\eta = -584.64(T_r - T_a)/I_a + 75.752$	$\eta = -1216.2(T_r - T_a)/I_a + 82.607$	

(바) 흡수기 입구의 열매체 온도에 따른 다 모듈 원추형 집광시스템 집열효율 분석

$(T_r - T_a)/I_a$ 에 따른 유량 별 비교를 통해 가장 높은 집열효율을 갖는 4L/min의 유량에 대해 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme)의 열효율 시험이 진행되었다. 순환유량은 약 0.067kg/s, 열효율 식은  $y = -321.49x + 71.844$ 로 나타나며  $x$ 는  $(T_r - T_a)/I_a$ 을 의미한다. 집열효율 실험은 열매체의 입구온도와 외기온도가 일치하였을 때인 20℃부터 40℃, 60℃, 80℃을 만족하였다. 유량을 계속 유지하며 Open loop system으로 하여 시스템 내부를 순환한 물을 외부로 배출하였다. 자동조절히터를 이용하여 열효율 시험에 필요한 각각의 열매체 입구온도를 일정하게 유지시켰다. Figure 5-17을 통해  $(T_r - T_a)/I_a$ 에 대한 집열효율 변화를 나타냈으며,  $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0일 때, 집열효율은 71.84%로 나타났다. 원추형 태양열 집광시스템에 공급되는 열매체 유입온도에 따른 효율을 나타내며, 열매체의 유입온도가 상승함에 따라 집열효율의 감소를 보였다. 또한, 일일 실험이 실시된 날과 비교하여 낮은 일사량과 외기온도로 인해 다소 낮은 열효율을 나타내었다.

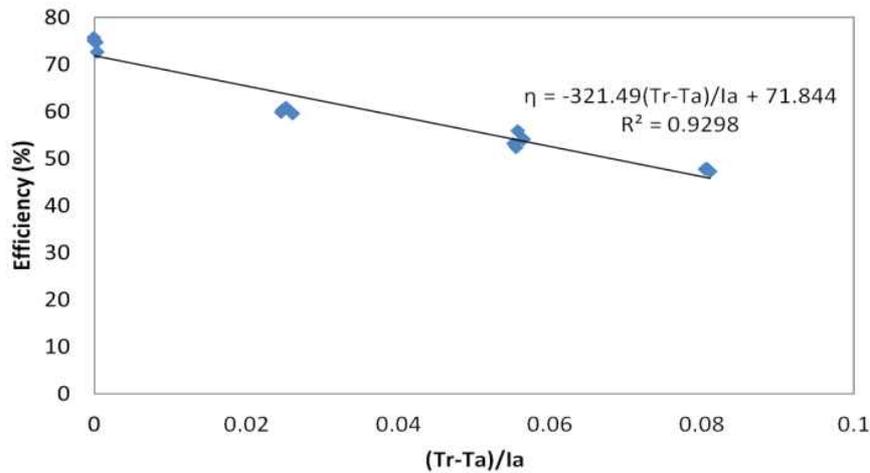


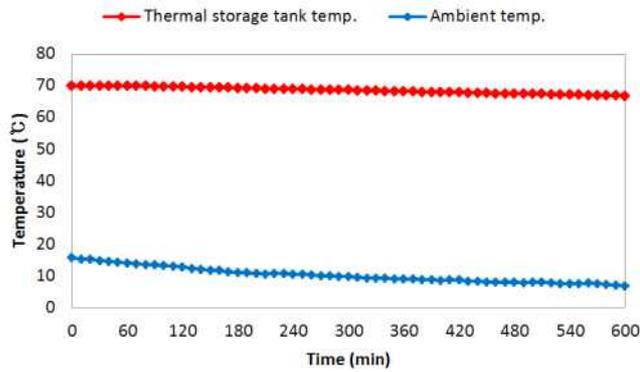
Figure 5-17. Collecting efficiency against at  $(T_r - T_a)/I_a$  for the optimal flow rate.

(2) 대형 축열조 성능분석

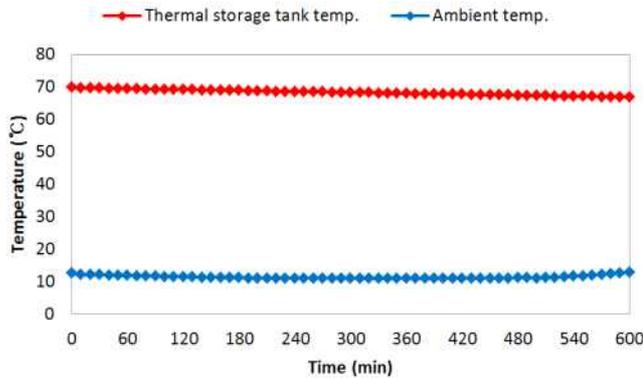
본 연구에서 축열조의 성능분석을 위해 축열조 내 용량을 500L로 열매체 물을 채운 후 보조열원을 이용하여 70℃까지 온도를 상승시켰다. 10시간 동안 외기온도 변화에 따른 축열조 내 열매체의 온도를 1분 단위로 정밀하게 측정하여 10분 평균 데이터를 사용하였다. Figure 5-18 및 Table 5-4와 같이 축열조 성능실험을 위한 1차 실험에서 외기온도는 15.67℃ ~ 6.87℃, 평균값 10.25℃로 나타났으며, 축열조 내 열매체의 온도는 초기온도 70.03℃ ~ 66.74℃로 약 3.29℃ 감소하여, 온도저감율

0.33℃, 축열조 효율 94.48%로 나타났다. 2차 실험에서 외기온도는 12.92℃ ~ 10.88℃, 평균값 11.35℃로 나타났으며, 축열조 내 열매체의 온도는 초기온도 69.85℃ ~ 66.85℃로 약 3℃ 감소하여, 온도저감율 0.3℃, 축열조 효율 94.87%로 축열조의 단열성능이 우수함을 보였다(Table 5-4). 축열조 효율은 식 (5-1)에 의해 계산하였다.

$$\eta = \left[ 1 - \frac{\text{축열조온도저감율}(\text{℃/hr}) \times 10\text{hr}}{\text{축열조초기온도}(\text{℃}) - \text{외기온도}(\text{℃})} \right] \times 100(\%) \quad (5-1)$$



(a) 1st experiment



(b) 2nd experiment

Figure 5-18. Thermal performance of storage tank.

Table 5-4 Efficiency of thermal storage tank

Experiment	Storage tank capacity (L)	Temperature reduction factor (°C/hr)	$\eta(\%)$
1st	500	0.33	94.48
2nd		0.3	94.87

### (3) 원추형 태양열 집광시스템의 MATLAB 결과 분석 및 검증

원추형 태양열 집광시스템을 통해 실제 실험시간 동안 측정된 실측 외기데이터를 기반으로 가장 높은 효율을 갖는 4L/min에 대해 MATLAB을 이용하여 분석을 하였다. 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위하여 최적 효율을 갖는 4L/min에서 축열조 용량 100L와 500L에 대한 축열조 내 열매체의 온도(Figure 5-19) 및 흡수기 출구의 열매체 온도(Figure 5-20)를 분석하였다. 축열조 용량 100L의 실험은 6월, 축열조 500L의 실험은 9월에 진행되었다. 실험 및 시뮬레이션 결과 축열조 내 열매체 및 흡수기 출구의 열매체 온도변화는 실험값과 예측 값이 유사한 경향을 나타내었고, 일정한 유속에서 축열조 내 열매체의 용량이 커지면 온도의 상승이 감소하였다. 검증된 시뮬레이션 모델은 다 모듈 원추형 태양열 집광시스템의 검증에 활용 될 수 있을 것이다.

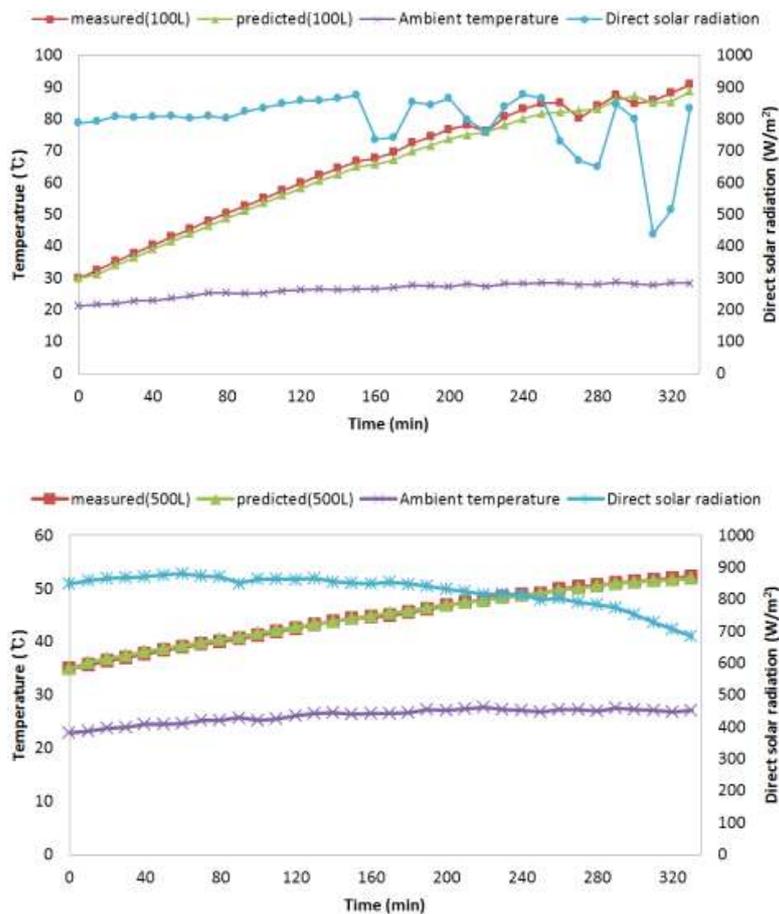
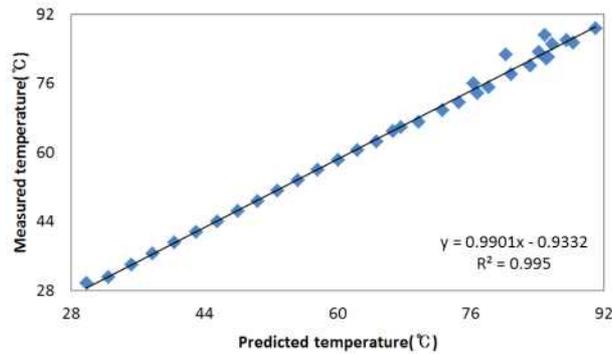
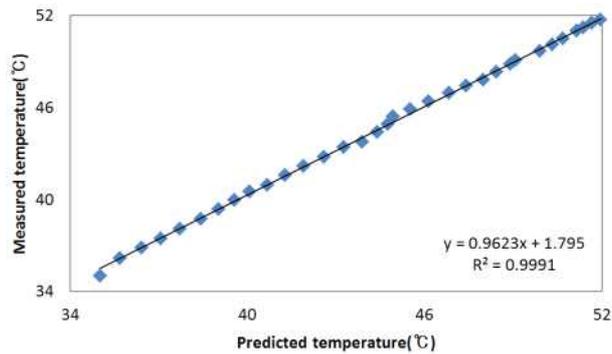


Figure 5-19. Comparisons for measured and estimated temperatures of heating medium inside the thermal storage tank according to the tank capacity.



(a) Thermal storage tank of 100L



(b) Thermal storage tank of 500L

Figure 5-20. Measured and predicted temperatures of heating medium at an exit of double tube absorber.

(4) 열화상카메라를 이용한 이중흡수기 표면온도 분석

본 연구에서는 열화상카메라(Thermo Gear G120, NEC, JAPAN)를 사용하여 유량변화 3L/min, 4L/min, 5L/min, 6L/min에 따라 이중흡수기의 표면온도를 Figure 5-21과 같이 촬영하였다. 실험 시작 360분 후 열화상 촬영을 하였으며, 이중흡수기의 상부, 중부, 하부의 온도를 나타내었다. 각 순환유량에서 집광비가 가장 높은 이중흡수기 상부의 온도가 높을 것이라 예상했지만, 이중흡수기 중부가 가장 높은 온도를 보였다. 이는 이중흡수기 상부가 외기와 가장 직접적으로 노출되어 있어 외기와 대류로 인한 열손실로 판단된다. 또한, 이중흡수기의 위치를 조절하기 위해 설치한 상부의 덮개고정기와 맞닿아 열손실의 면적이 더욱 증가한 것으로 보인다.

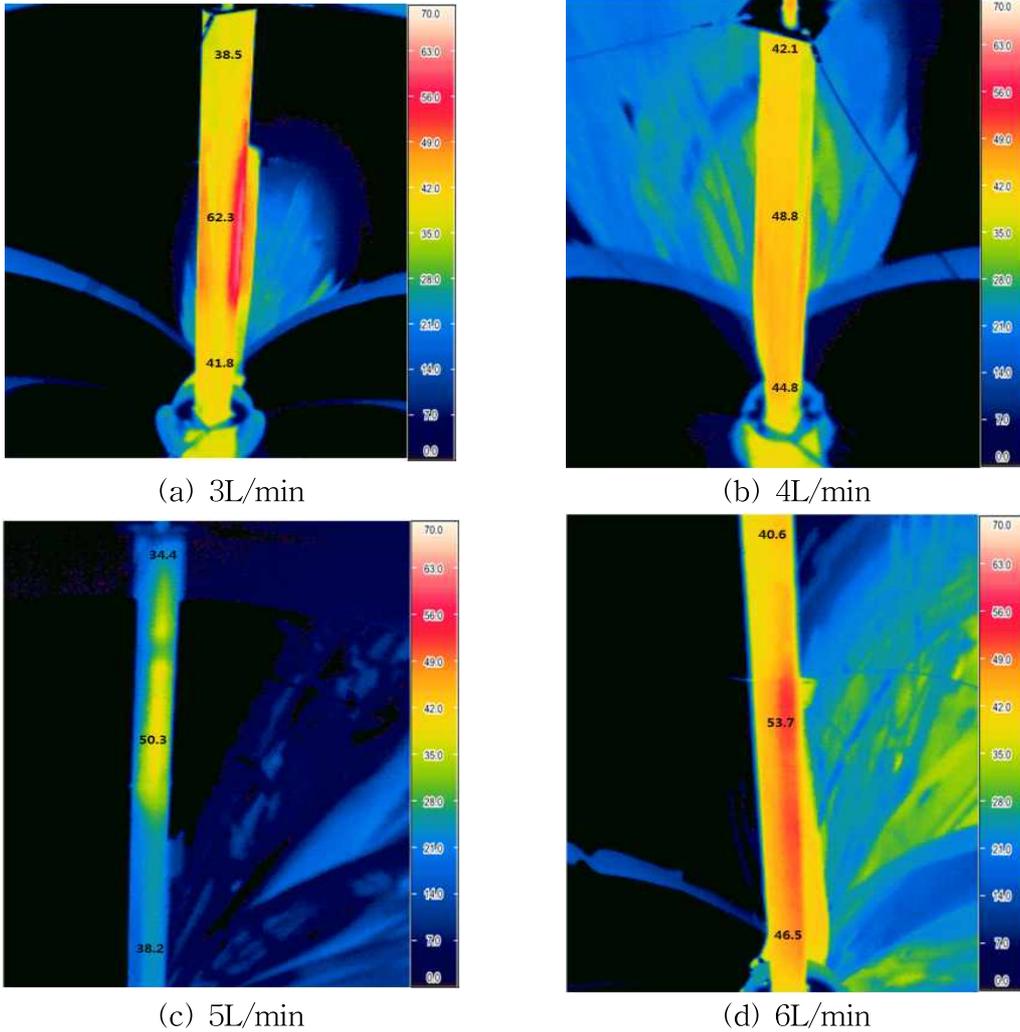


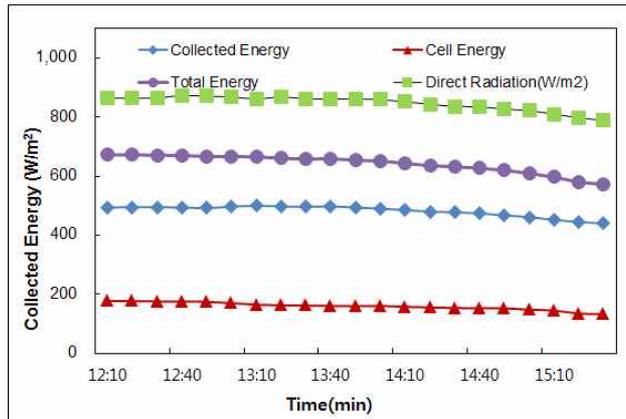
Figure 5-21. Image of temperature distribution for absorber surface with thermo camera.

#### 다. 단일 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능분석 결과

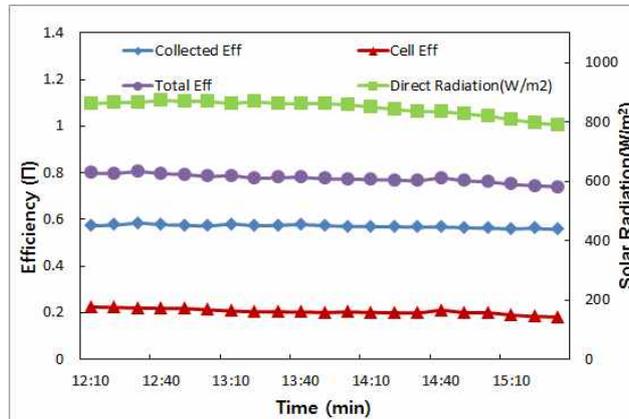
단일 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능실험은 원추형 집광기의 집열효율이 가장 우수한 유량인 4ℓ/min의 일정한 유량 조건에서 수행하였다. 성능실험은 오후 12시 10분부터 3시 10분까지 수행되었으며, 10분 평균 직달일사량, 흡수기 입구 및 출구에서의 열매체 온도, 외기 온도를 측정하여 단일 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능을 분석하였다.

Figure 5-22 (a)는 단일 모듈의 원추형 복합시스템의 집열 및 CPV 셀 발전 에너지를 나타낸 그림이다. 실험시간 동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 482W/m<sup>2</sup> 및 160W/m<sup>2</sup>였고, 평균 합산 에너지는 642W/m<sup>2</sup>로 나타났다. 따라서 단일

모듈의 원추형 복합시스템의 집광면적은  $0.785\text{m}^2$ 으로, 504W의 복합 에너지를 생산할 수 있는 출력을 갖는 것으로 분석되었다. Figure 5-22 (b)는 단일 모듈의 원추형 복합시스템의 직달 일사량 변화와 흡수기의 집열효율 및 CPV 셀의 발전효율을 나타내고 있다. 실험기간동안 평균 집열 및 발전효율은 각각 57% 및 21% 였고, 따라서 단일 모듈의 복합시스템 합산효율은 78%로 나타났다.



(a) Collected energy



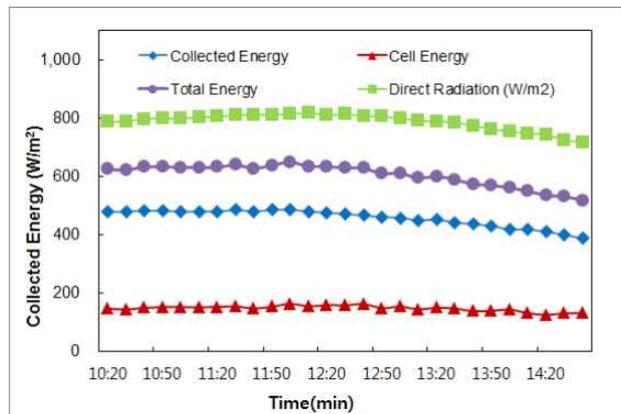
(b) Efficiency

Figure 5-22. Heat collecting energy and CPV cell electric energy with efficiency of single module of CPV/T conical system.

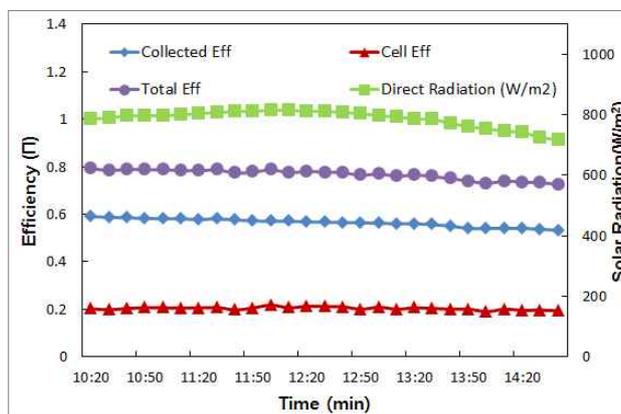
#### 라. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템 성능실험 결과 및 분석

다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능실험 또한 원추형 집광기의 집열효율이 가장 우수한 유량인  $4\ell/\text{min}$ 의 일정한 유량 조건하에서 수행되었다. 성능실험은 오전 10시 10분부터 오후 2시 40분까지 수행되었으며, 10분 평균 직달일사량, 흡수기 입구 및 출구에서의 열매체 온도, 외기 온도를 측정하여 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능을 분석하였다. Figure 5-23 (a)는 다 모듈 원추형 복합시

시스템의 집열 및 CPV 셀의 발전 에너지에 대한 그림이다. 실험 시간동안 한 모듈의 원추형 태양광-열 복합집광기로 부터 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각  $459\text{W/m}^2$  및  $148\text{W/m}^2$ 이었고, 평균 합산 에너지는  $607\text{W/m}^2$ 로 나타났다. Figure 5-23 (b)는 다 모듈 원추형 복합시스템의 직달 일사량 변화와 흡수기의 집열효율 및 CPV 셀의 발전효율을 나타내고 있다. 다 모듈 원추형 복합시스템의 평균 집열 및 발전효율은 단일 모듈의 원추형 복합시스템 보다 1%씩 낮은 각각 56% 및 20% 나타내었고, 따라서 다 모듈 복합시스템의 합산효율은 집열 및 발전효율을 더한 76%로 나타났으며, 일반 PV 모듈의 발전효율 보다 약 5% 정도 높은 것으로 나타났다. 단일 모듈의 원추형 집광기의 집광면적은  $0.785\text{m}^2$ 으로, 다 모듈 원추형 복합시스템은 4개의 단일 모듈 원추형 집광기로 구성되어 있기 때문에 집광면적은 4배인  $3.14\text{m}^2$ 이 된다. 따라서 다 모듈 원추형 복합시스템의 에너지 생산능력은 태양열 집열 에너지  $1,441\text{W}$ 와 전기 에너지  $465\text{W}$ 를 포함한  $1,906\text{W}$ 의 복합에너지를 생산할 수 있는 출력을 갖는 것으로 분석되었다.



(a) Collected energy

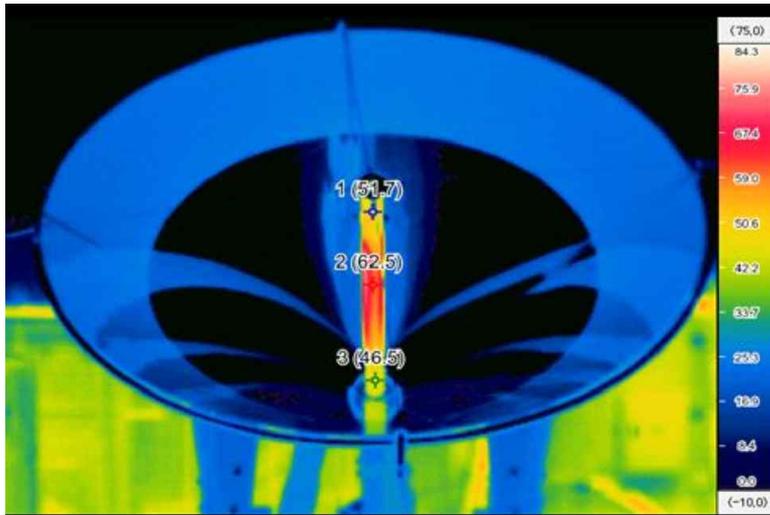


(b) Efficiency

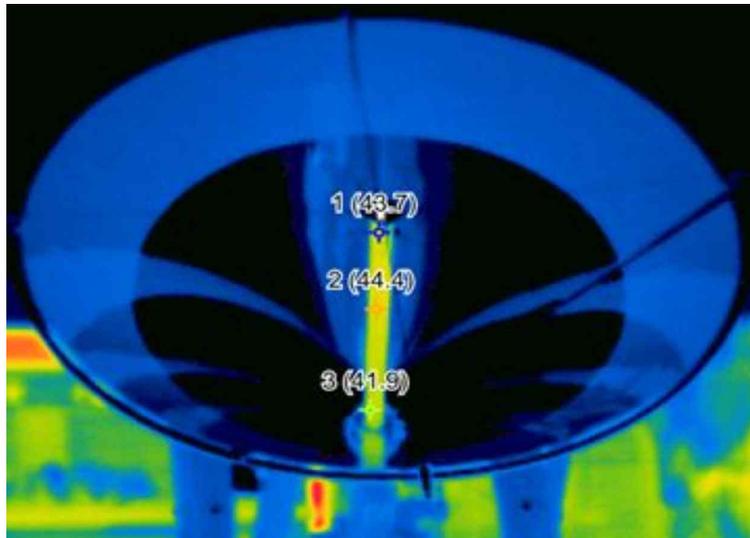
Figure 5-23. Heat collecting energy and CPV cell electric energy with efficiency of multi module of CPV/T conical system.

#### 마. 원추형 태양광-열 복합 집광기의 흡수관 표면 및 CPV 셀 온도분포 분석

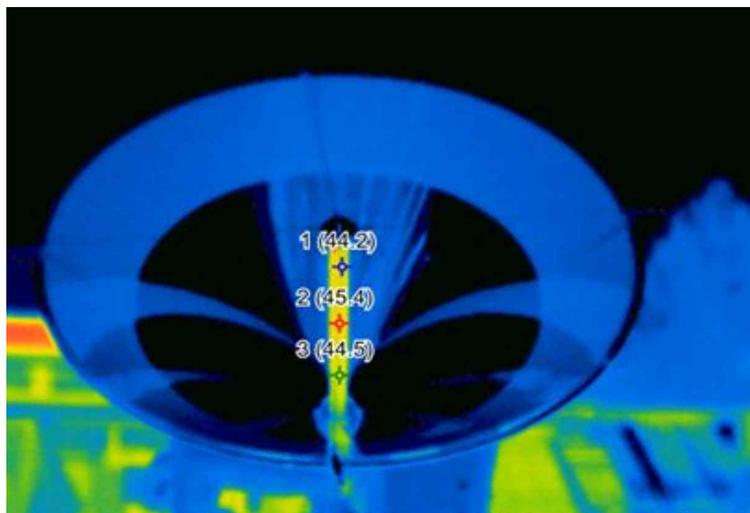
동일한 외기 조건에서 성능실험 동안 원추형집광기의 열매체 유량이 각각 2L/min, 4L/min, 6L/min에 일 때 흡수관 표면 온도를 열화상 카메라에 의해 분석하였다. Figure 5-24와 같이 유량이 낮은 2L/min 일 때 흡수관 표면 온도가 가장 높아, 흡수관 상부, 중부, 하부에서 각각 51.7°C, 62.5°C, 46.5°C의 온도분포를 나타내었다. 그러나 유량이 중간 정도인 4L/min 일 때 흡수관 표면 온도는 가장 낮고 흡수관 상부, 중부, 하부에서 각각 43.7°C, 44.4°C, 41.95°C의 대체로 고른 온도분포를 나타내었다. 또한 유량이 높은 6L/min 일 때 흡수관 표면 온도는 흡수관 상부, 중부, 하부에서 각각 44.27°C, 45.4°C, 44.5°C의 온도분포를 나타내어, 유량 2L/min 일 때 보다는 낮은 온도분포를 보였으나, 유량 4L/min에서 보다는 다소 높게 나타났다. 본 연구결과에 의하면 유량 4L/min에서 원추형 집광기의 집열효율이 가장 높게 나타났으며, 따라서 유량 4L/min에서 흡수관 표면의 온도가 다른 유량에 비해 낮게 나타난 것은 태양 복사열 회수성능이 2L/min 및 6L/min에 비해 유량 4L/min에서 가장 우수하였기 때문인 것으로 분석된다. 집열효율이 가장 우수한 유량 4L/min에서 보조 집광기와 함께 CPV 셀을 부착한 흡수관 표면에서의 온도분포를 열화상 카메라로 분석한 결과 CPV 셀 표면 온도는 40.5°C 및 41.6°C를 나타내었으며, 흡수관 표면의 온도는 다소 CPV 셀 표면보다 다소 높은 42.9°C, 42.8°C, 43.1°C를 나타내었다(Figure 5-25)



(a) 2 L/min



(b) 4 L/min



(c) 6 L/min

Figure 5-24. Analysis of temperature distribution of absorber with infrared thermal camera.

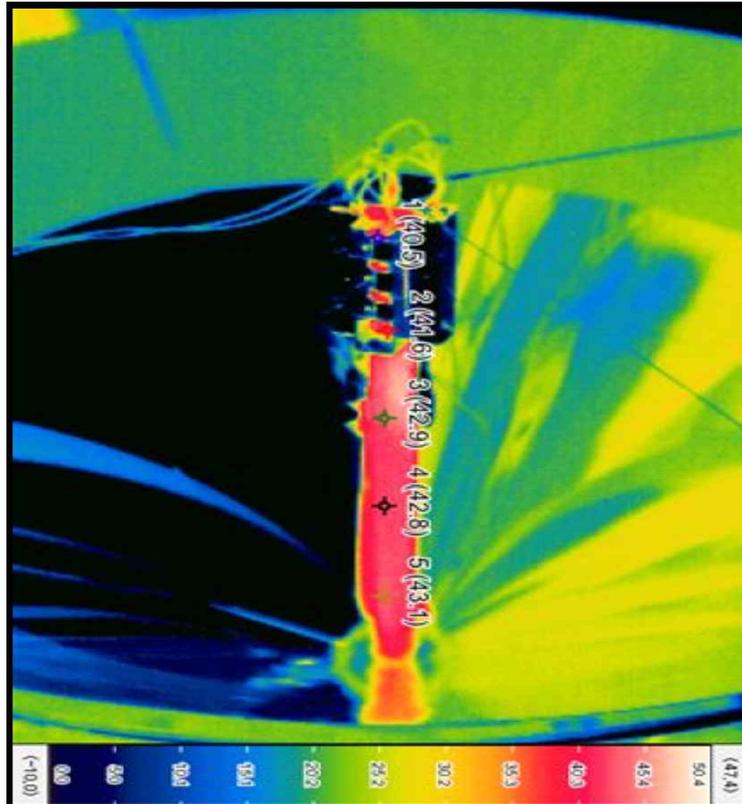


Figure 5-25. Analysis of temperature distribution of absorber attached with CPV cells at flow rate of 4L/min using infrared thermal camera.

## 2. 건조장치 설정온도 별 도달시간 및 온·습도 변화

다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용하여 가열된 열매체가 건조장치 내 열교환기를 통해 건조장치의 내부를 순환하며 설정온도에 도달하게 된다. 축열조 내 열매체 500L가 일정한 온도로 유지하기 위하여 보조열원을 사용하였다. Figure 5-26에서 축열조 내 열매체의 온도가 70℃일 때, 건조장치 내부의 초기온도 약 28℃부터 시작하여 각각의 설정온도 40℃, 50℃, 60℃로 도달할 때까지 걸린 시간은 20분, 45분, 60분이 소요 되었으며, 건조장치 내 습도의 변화는 가동초기에 Figure 5-27과 같이 25 ~ 35% 범위에서 변화였다. 그러나 가동시간이 길어질수록 건조장치 내의 습도는 낮아지며, Figure 5-28에 10시간 동안 건조 설정온도에 따른 온·습도의 변화를 나타내었다. 모든 건조온도에서 건조장치 내의 상대습도는 1% 내에서 변하는 것으로 나타났다. 건조온도 40℃, 50℃, 60℃의 각각에 대해 건조장치 내의 평균적인 상대습도는 5%, 4.5%, 1.5% 정도를 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 설정된 건조온도가 높을수록 건조실 내의 상대습도는 낮아지는

것으로 나타났다. 설정온도 별 건조장치 내의 건조온도는  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 잘 유지됨을 알 수 있었다(Figure 5-28). 따라서 건조장치에 설비된 제어기를 통해 농산물의 원활한 건조를 위해 설정한 온도로 잘 유지됨을 알 수 있었다.

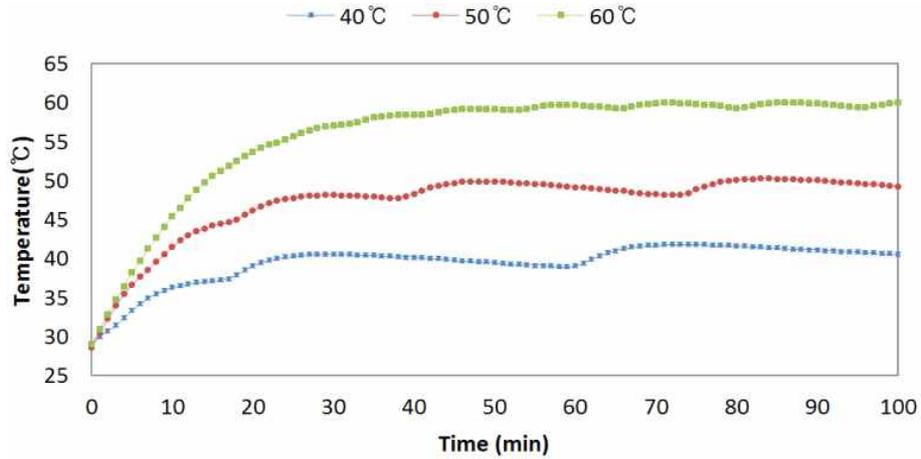


Figure 5-26. Temperature variation in dryer on initial state

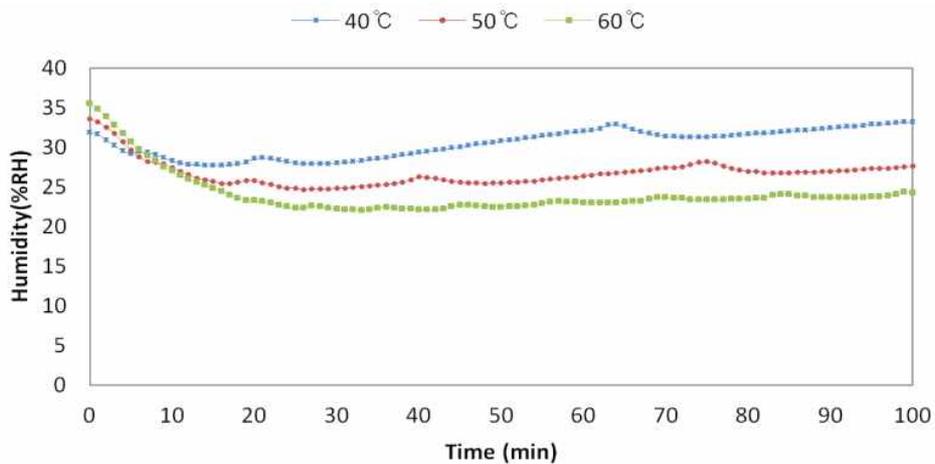
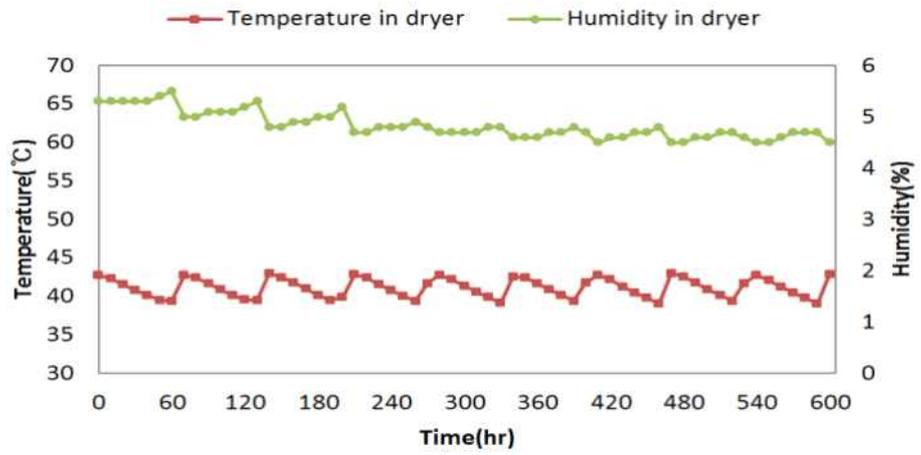
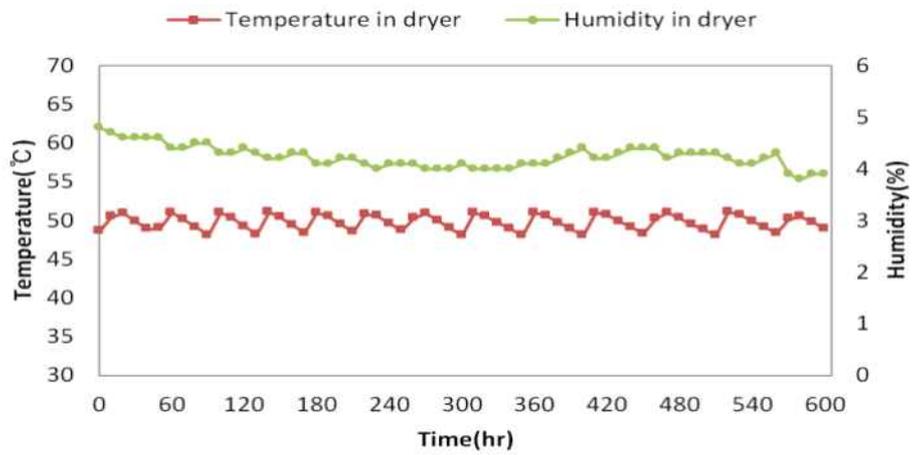


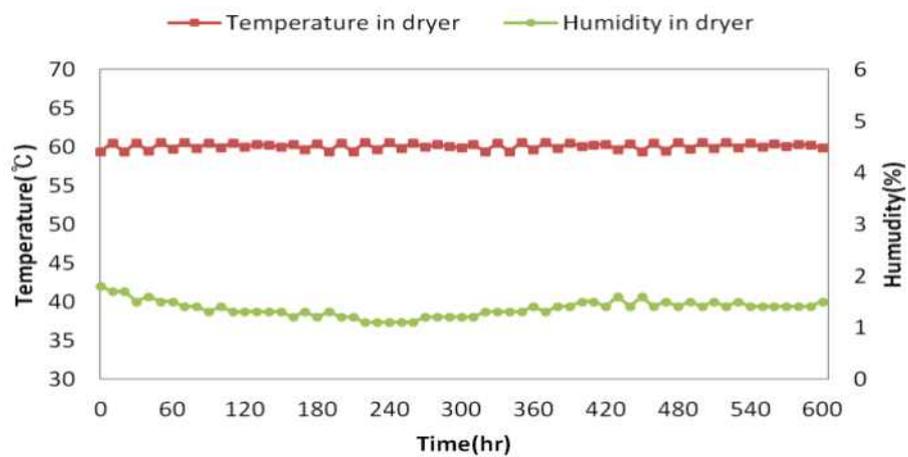
Figure 5-27. Humidity variation in dryer on initial state.



(a) Setting temperature 40°C



(b) Setting temperature 50°C



(c) Setting temperature 60°C

Figure 5-28. Temperature and humidity variation in dryer according to the setting temperature.

### 3. 건조장치의 농산물 건조특성 결과 및 분석

#### 가. 건조장치의 농산물 건조실험 방법 및 환경

제작된 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치의 건조특성 분석을 위해 애호박(경상남도 진주)과 당근(수입)을 실험재료로 선정 후 인근 마트에서 구입하여 실험에 사용하였다. 애호박은 지름 4.5cm, 두께 0.3cm, 무게 50g으로 절편 후 사용하였으며, 당근은 지름 5cm, 두께 0.7cm, 무게 50g으로 절편 후 사용하였다. 시료의 초기함수율 측정을 위해 공기오븐을 이용하여 80℃에서 40시간 가열하였다. 가열된 시료는 데시케이터에 30분 둔 다음 무게를 측정하였다. 이와 같은 방법을 사용하여 건량기준함수율(d.b.)로 나타내었다.

공기 오븐과 동일하게 절편한 애호박과 당근을 제작된 농산물 건조장치를 이용하였다. 축열조 내의 열매체 온도는 초기에 다 모듈 원추형 집광시스템에 의해 70℃로 상승시켰으며, 건조기간 동안 축열조 내의 열매체 온도가 내려가면 축열조 내 보조열원이 작동하도록 하여 축열조 내의 열매체 온도를 항상 70℃로 유지시켰다. 건조장치 내 건조온도는 50℃로 설정하여 건조 실험을 수행하였다. 건조기간 동안 정확도 소수점 셋째자리의 전자저울을 사용하여 4시간 마다 시료의 무게를 측정하여 함수율 변화를 분석하였다. 건조 실험은 5회 반복하여 수행하였다.

#### 나. 건조장치의 농산물 건조특성 분석

건조장치 내에서의 평형함수율 측정을 위해 실험재료인 애호박과 당근은 건조실험 후 건조장치에서 꺼내어 건조오븐에서 80℃로 40시간 건조 후 평형함수율을 계산하였으며, 애호박 및 당근의 건조실험 후 건조기 내에서의 평형함수율은 각각 22.6%(d.b.), 2.1%(d.b.)로 나타났다. 애호박과 당근의 건조곡선과 건조 후의 모양은 Figure 5-29 및 Figure 5-30과 같으며 건조시간에 따른 함수율 비를 비교하였다. 평형함수율( $M_e$ )는 측정된 값을 사용하였으며, 함수율의 비는 식 (5-2)와 같다. 건조곡선의 결정계수( $R^2$ ) 값은 0.96 이상으로 나타나 건조시간에 따른 함수율 비(MR)가 지수함수로 잘 표현되었음을 나타내었다. 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치를 이용해 건조된 애호박과 당근의 초기함수율 및 평형함수율과 반 건조시간은 Table 5-5와 같다. 애호박 및 당근의 품질변화를 실험 전후의 색도 차( $\Delta E_{ab}$ )로 나타내었으며, 애호박 및 당근 각각 78.0 및 28.3으로 나타났다.

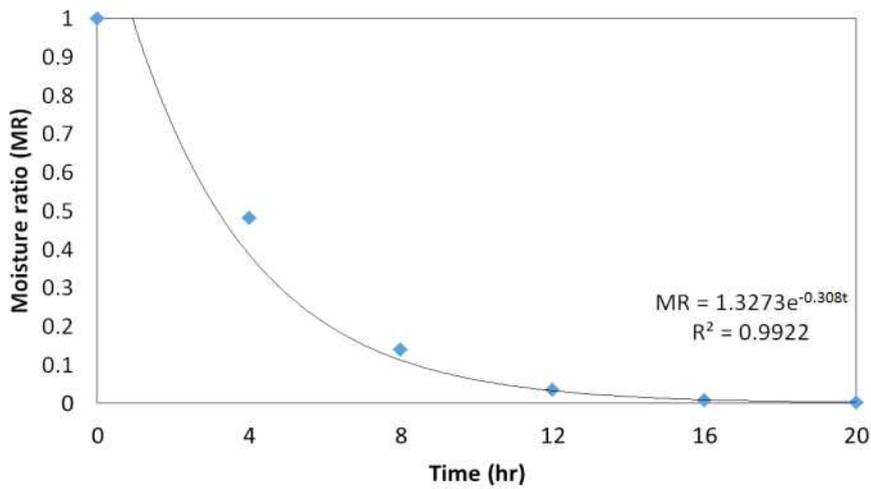
$$(M - M_e) / (M_o - M_e) : \text{함수율 비}(MR) \quad (5-2)$$

여기서,

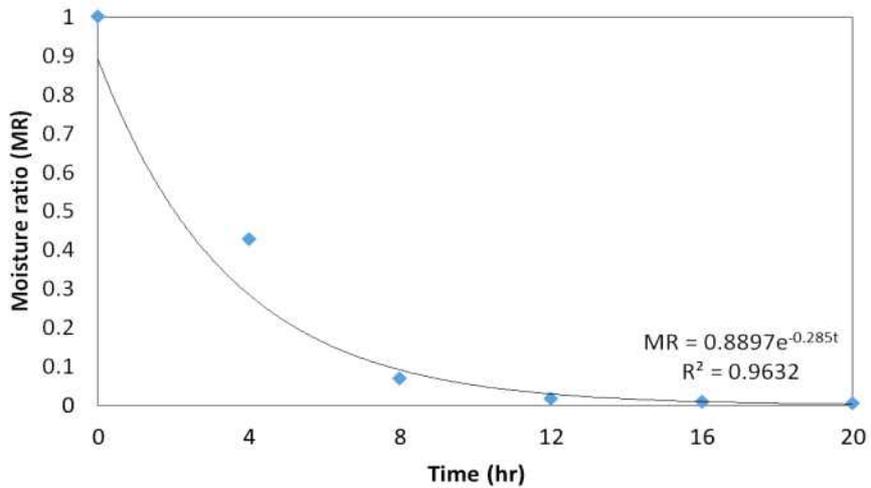
$M$  = 건량기준 함수율,  $M_o$  = 건량기준 초기함수율,  $M_e$  = 건량기준 평형함수율

Table 5-5 Drying time of agricultural products

Experimental material	Drying temperature (°C)	Thickness (mm)	IMC (%)		EMC (%)		Half drying time (MR=0.5hr)
			(d.b.)	(w.b.)	(d.b.)	(w.b.)	
Green pumpkin	50	0.3	1436.32	93.5	25	20	3
Carrot	50	0.7	243.3	70.87	4.3	4.12	2

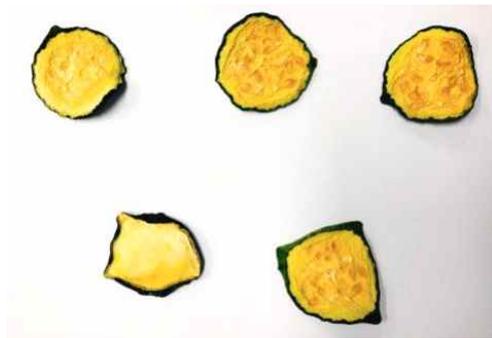


(a) Dry curve of green pumpkin



(b) Dry curve of carrot

Figure 5-29. Dry curve of agricultural products.



(a) Green pumpkin



(b) Carrot

Figure 5-30. Image of dried agricultural products.

Table 5-5 Drying time of agricultural products

Experimental material	Drying temperature (°C)	Thickness (mm)	IMC (%)		EMC (%)		Half drying time (MR=0.5hr)
			(d.b.)	(w.b.)	(d.b.)	(w.b.)	
Green pumpkin	50	0.3	1436.32	93.5	25	20	3
Carrot	50	0.7	243.3	70.87	4.3	4.12	2

#### 다. 원추형 태양열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치의 경제성 분석

본 연구에서 다 모듈 원추형 태양광-열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치를 제작하였으며, 건조장치의 가동은 청명한 날 3일 동안 6시간 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 가동에 의해 축열조 내의 열매체를 70°C로 상승시켜 건조에 이용한다. 또한 악천후 및 야간의 태양광이 부족할 시에는 태양광 발전에 의해 축전된 전기에 의해 축열조 내의 보조열원을 가동하여 축열조 내의 축열매체 온도를 항상 70°C로 유지한 상태에서 건조장치가 가동된다. 건조에 필요한 축열량 및 발전량 산정은 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 성능분석 결과를 토대로 다음과 같은 기준하에 수행되었다.

- 건조장치 가동 전 다 모듈 원추형 집광시스템의 축열 및 발전은 일사량 800W/m<sup>2</sup>을 기준으로 한 청명한 날 3일 동안 6시간 가동된다.
- 축열조 내 열매체는 물을 사용하며, 400L 용량을 기준으로 초기온도 20°C에서 건조장치 가동에 필요한 70°C로 상승시킨다.

- 원추형 태양열 집광시스템의 개당 집열면적은  $0.785m^2$ 으로 4개로 구성된 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템의 총 집열면적을  $3.14m^2$ 이다.
- 성능분석을 통해 도출된 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 집열효율 56%, 발전효율 20%(합산효율 76%)를 기준으로 하였다.

다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 3일 가동 동안 얻을 수 있는 집열 에너지( $Q_{solar}$ )는 식 (5-3)과 같다.

$$Q_{solar} = 800 W/m^2 \times 3.14m^2 \times 6hr/day \times 0.56 \times 3day = 25.32kWh \quad (5-3)$$

다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 3일 가동 동안 얻을 수 있는 태양광 발전량( $Q_{elect.}$ ) 산정은 식 (5-4)와 같다.

$$Q_{elect.} = 800 W/m^2 \times 3.14m^2 \times 6hr/day \times 0.20 \times 3day = 9.04kWh \quad (5-4)$$

실제로 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 축열조 내 열매체인 물을 초기  $20^\circ C$ 에서 건조장치 가동에 필요한  $70^\circ C$ 로 상승시키는데 필요한 열량은 식 (5-5)와 같다.

$$Q_{tank} = m \times C_p \times \Delta T = 400kg \times 4.2kJ/kg^\circ C \times 50^\circ C = 23.3kWh \quad (5-5)$$

여기서,

$m$  = 축열조의 용량 (kg)

$C_p$  = 열매체의 비열 ( $4.18kJ/kg^\circ C$ )

$\Delta T$  = 온도 차 ( $^\circ C$ )

따라서, 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 3일 가동 동안 얻을 수 있는 집열 에너지( $Q_{solar}$ )는  $25.32kWh$ 로 축열조 내 열매체인 물을 초기  $20^\circ C$ 에서 건조장치 가동에 필요한  $70^\circ C$ 로 상승시키는데 필요한 열량  $23.3kWh$  보다 다소 높다. 따라서 청명한 날 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 3일 가동은 건조장치 가동에 충분하다고 판단된다. 또한 본 시스템은 월평균 21일 가동 시 월  $240.52kWh$ 의 에너지 생산이 가능하다.

본 건조실험 결과에서 단호박 및 당근 절편을 10%(wb)까지 건조시키는데 약 10시간이 소요되었다. 따라서 10시간의 건조 기간 동안 보조열원 및 부대설비 가동을

위해 생산된 태양광 발전전력은 9.04kWh로, 축열조의 단열효율이 95%로 열손실이 매우 적어 보조열원 가동에 4.04kWh 정도면 충분할 것이고 및 부대설비 가동에 5.0kWh가 소요되면 충분할 것으로 추정된다.

농산물의 건조시간은 함수율이 10%(wb)에 도달하는 10시간을 기준으로 하였으며, 농산물 연간 5,100kg 건조를 기준으로 하였다. 건조 1회 최대 건조량은 50kg를 기준으로 하여 월 평균 8.5회 건조하는 것을 기준으로 하였다. 농사용 전기 요금은 50.51원/kWh를 기준으로 계산하였다.

또한, 현재 신재생에너지 설비에 대하여 설치비의 일정부분을 정부에서 무상보조 지원받는 보급 보조사업이 진행되고 있다. 이를 통해 개발된 신재생에너지기술의 상용화된 일반 보급설비로서 설치비의 최대 60% 이내로 지원 받을 수 있다. 본 건조장치와 유사한 건조용량을 갖는 건조기 제품은 약 250만원이며, 다 모듈 원추형 태양광-열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치의 추정 가격은 450만원으로 전체 소요시설비용의 60%를 지원받을 경우와 정부 지원이 없는 경우로 구분하여 경제성 분석을 수행하였다. 건조장치의 내구 년은 20년으로 가정하였으며, 20년 후 건조장치의 잔존가치는 구입가격의 10%로 산정하였다 (Table 5-6). 또한, 초기투자비용, 감가상각비, 전력소요비용 등을 고려하여 경제성 분석을 수행하였다. 다 모듈 원추형 태양광-열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치 초기 구입비에 대한 정부 보조가 없는 경우는 20년간 가동하여도 759,240원의 손실을 보게 되나, 건조장치 구입에 대한 정부 보조가 60%일 경우는 20년간 가동 시 1,940,760원의 이득이 돌아오며, 9년 정도만 가동하면 초기 설치비가 회수 될 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 본 건조장치는 동일한 용량의 건조기 제품에 비해서도 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

Table 5-6 Comparison of electric dryer and solar utilization dryer

Contents	Solar utilization dryer (Governmental assistance)	
	0%	60%
Single dry capacity (kg)	50	50
Annual dry production (kg)	5,100	5,100
Drying time (hr)/1 time	10	10
Annual operating time (hr)	1,020	1,020
Life (year)	20	20
Consumption power (kWh)/1 time	34.36	34.36
Consumption power/year (kWh)	3,505	3,505
Equipment cost (won)	4,500,000	1,800,000
Monthly electric cost (won)	14,753	14,753
Annual electric cost (won)	177,038	177,038
Depreciation cost (won)	200,000	200,000
Residual value of dryer (won)	400,000	400,000
<b>Annual total cost for 20 year operation (won)</b>	<b>3,540,760</b>	<b>3,540,760</b>
<b>Saving cost for 20 year operation (won)</b>	<b>-759,240</b>	<b>1,940,760</b>

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 연구개발목표의 달성도

#### 1. 세부 연구목표 대비 달성도

구분 (연도)	세부연구목표	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)
1차 년도 (2015)	○ 원추형 반사판 설계 및 제작	-원추형 반사판 성능의 우수성	100
	○ 집광기의 흡수기 개발	-흡수기의 기능성 및 열회수 성능의 우수성	
	○ 태양추적장치 및 축열조 설비	-태양추적장치의 태양추적 정밀도 및 축열조의 단열성	
	○ CPV셀 Array 설계 및 제작	-CPV셀 부착의 견고성	
	○ 단일 및 다 모듈 CPV/T 복합 집광시스템 설비	-단일 및 다 모듈 CPV/T 복합 집광시스템 설비의 우수성	
	○ 원추형 CPV/T 복합 집광시스템 성능 분석	-단일 및 다 모듈 원추형 복합시스템 성능의 우수성	
2차 년도 (2016)	○ 건조실 설계 및 제작	-건조실 구조 및 건조온도 제어장치의 우수성	100
	○ 태양광 발전 자체 생산전력 이용시스템 구축	-태양광 발전 자체 생산전력 이용시스템의 완전성	
	○ 다 모듈 원추형 복합 집광시스템과 통합된 에너지 자립형 건조장치 설계/제작	-다 모듈 원추형 복합 집광시스템과 통합된 에너지 자립형 건조장치의 우수성	
	○ 건조장치 운전성능 및 건조 특성 분석	-건조기 내 설정온도 유지성능 및 건조특성 분석의 우수성	
	○ 복합 집광시스템을 이용한 건조장치 경제성 분석	-건조장치 에너지 경제성 분석의 타당성	
최종 평가	○ 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발	-단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템의 완전성	100
	○ 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템을 이용한 건조장치 개발	-다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치의 구조적 완전성	
	○ 건조장치 건조특성 및 경제성 분석	-농산물 건조특성 및 건조장치 경제성 분석의 타당성	

2. 연구성과 목표 및 달성도

가. 연구성과 목표 및 달성도

단위 : 건수)

구분		특허		논문		학술발표	인력양성	기타(타 연구 활용 등)
		출원	등록	SCI	비SCI			
1차 년도	목표	1		0	1	3	3	0
	달성	1		1	1	9	3	0
2차 년도	목표	1		1	1	2	2	1
	달성	1		1	0	5	4	1
계	목표	2		1	2	5	5	1
	달성	2		2	1	14	7	1

나. 연구개발 정량적 목표 및 달성도

(주요성능 Spec)	단위	전체항목 에서 차지하는 비중(%)	개발목표치		목표달성치		비고
			1차 년도	2차 년도	1차 년도	2차 년도	
태양광-열 집광시스템 복합효율	%	25	60이상		76		
복합 집광시스템 열-전기 에너지 출력	W	25	1,500이상		1,906		
건조장치 최저 건조온도	℃	25		40이상		60	
건조장치 에너지 자립도	%	25	-	50이상	-	100	
합 계		100%	-	-	-	-	

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 측면

가. 원추형 태양광-열 복합시스템(CPV/T) 개발은 농업시설에 필요한 열과 전기 에너지를 동시에 생산할 수 있어 농산물 건조장치 뿐만 아니라 농업시설물(온실, 축사) 및 농가의 난방 열원으로 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

- 나. 태양광 집광 및 발전 효율이 우수한 CPV 부착 원추형 태양광-열 복합시스템을 개발하여 농산물 건조장치의 열원뿐만 아니라 농업시설 난방에 이용함으로써 기존의 유류사용 난방기를 대체할 수 있고 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 시스템이 될 것이다.
- 다. 본 과제를 통하여 선진국 수준이상의 가격경쟁력을 갖춘 새로운 태양광-열 복합 집광시스템 모델 개발이 용이할 것이다.
- 라. 신기술의 도입에 의해 기존 태양에너지시스템의 열 또는 전기 독립 생산 시스템의 문제점을 극복하고 세대교체를 이룰 수 있으며, 고효율의 열 및 전기 동시 생산 시스템으로의 전환점을 마련할 수 있을 것이다.
- 마. 본 연구는 태양 열 및 전기를 효율적이고 생산 할 수 있는 장치개발의 모델이 될 것이며, 태양열 집열기술 및 태양광 발전기술에 대한 복합적 응용기술을 증진시키는데 큰 도움이 될 것임.

## 2. 경제·산업적 측면

- 가. 유류비용의 증가로 에너지난을 겪고 있는 농촌의 열원을 위한 대체에너지로 이용함으로써 농업에너지 난을 타개할 수 있을 뿐만 아니라 정부의 적극적 지원 하에 원추형 태양광-열 복합시스템을 확대 보급할 수 있을 것이다.
- 나. 농업분야 뿐만 아니라 타 분야의 산업적으로 이용이 확대될 수 있어 기술적 우위에 의한 국내 시장 점유율 증가와 수입대체 및 수출에 의한 경제적 이익뿐만 아니라 에너지 절약의 파급 효과가 크게 기대된다.
- 다. 기후변화 협약 후 선진국들의 경우 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위해 대체에너지 연구개발에 대한 정부의 지원을 증가시키는 추세에 있으며 이에 따라 여러 대체 에너지자원 중에서 높은 점유율을 차지하는 태양 에너지(태양열, 태양광)를 이용한 장치의 개발 및 이용이 현격히 증가할 것으로 예상된다.
- 라. 본 과제를 통하여 저비용의 고효율 원추형 태양광-열 복합시스템을 개발하여 농업에 이용함으로써 농가의 에너지 비용을 줄이고, 대규모 수요 창출에 의한 유류의 수입대체 효과를 극대화시킬 수 있을 것이다.

## 제 5 장 연구개발 성과 및 활용계획

### 제 1 절 실용화 및 산업화 계획

1. 현재 태양열 이용시스템과 태양광 발전시스템은 열 또는 전기 생산을 목적으로 서로 독립적으로 이용되고 있으나, 집광형 태양전지가 개발됨에 따라 본 연구에서 같이 집광형 태양전지(CPV)를 부착한 원추형 집광시스템 개발은 4계절 고온의 열과 전기를 동시에 생산할 수 있어 농산물 건조장치 뿐 아니라 농업시설 난방 등 고온의 열 및 전기를 동시에 이용하는 산업분야에 활용성이 매우 클 것이다.
2. 본 과제를 성공적으로 완료함으로써 여러 용도처 개발을 단계적으로 추진할 예정이며, 본 과제를 통해 축적된 원추형 태양광-열 복합 집광시스템에 대한 자체 설계기술 및 시스템 화기술, 최적화 설계 Know-How(성능, 시공성 및 제조원가 측면)를 바탕으로 농가의 농산물 건조장치, 농가주택 난방, 온실난방의 열원으로 이용할 뿐만 아니라 추후에는 일반 가정용으로 저가의 온수급탕 및 냉난방용으로 그 용도를 적용할 것이며, 또한 산업공정열 이용분야 및 발전용 시스템에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 원추형 태양광-열 복합시스템 개발기술을 특허신청하고, 기업체에 기술 이전함으로써 기술료징수가 가능케 할 것이며, 기업체의 독자적인 기술 확보 및 기업체의 주 생산 기종이 될 수 있을 것이다.
4. 본 연구개발을 통한 Pilot Plant 규모의 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 건조장치 보급모델(원추형집광 면적: 3.14m<sup>2</sup>, 건조장치 용량: 50kg/1회)을 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획이다.
5. 본 기술개발에 의해 개발될 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 건조장치는 신재생에너지 설비에 대한 정부 보조사업을 통해 농가보급을 극대화 할 것이다.
6. 본 연구를 통해 기존 태양에너지시스템의 문제점을 극복하고 태양광-열을 통합한 복합 집광시스템으로의 세대교체를 이룰 수 있으며, 신기술 산업화의 전환점을 마련할 수 있을 것이다.
7. 본 연구에 의한 개발 기술의 이용 가능 분야는 Table 5-1과 같다.

Table 5-1 Application fields for system developed in this stud

농어촌 대체에너지원	중소형/대용량 온수급탕 및 냉난방	산업용 저온 공정분야	산업용중온공정분야
-건조장치 에너지원 -농업시설 냉난방 에너지 (온실, 축사 등) -농가주택 냉난방 -양어장 가온	-일반/공동주택 -공공건물/복지시설 -아파트단지 -상업용 건물	-식품용기(병&캔)세척 온수 -염색공정 -콘크리트벽돌 양생	-식품가공업 -섬유제조업 -제지 및 펄프공정의 건조

8. 본 과제를 통한 산업화 단계 및 방안은 다음과 같음.

단계	제품 양산계획
개발완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원추형 태양광-열 복합(CPV/T) 집광시스템 제조원가 절감방안(기술변경, 생산 공정 측면) 확보</li> <li>○ 원추형 복합 집광시스템 공정설계 구축 및 생산설비 구축</li> </ul>
산업화(1차)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양산을 위한 원추형 태양광-열 복합(CPV/T) 집광시스템 생산 공정 자동화 구축</li> <li>○ 흡수기 임가공 및 태양추적 제어부 자체생산</li> <li>○ 공장 직관/사후관리체계 확보</li> <li>○ 품질검사/시험 체계 구축</li> </ul>
산업화(2차)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 성능 및 내구성향상을 통한 제품의 신뢰성 확보</li> <li>○ 임가공품에 대한 선별적 자체생산 추진</li> <li>○ 고객 지향적인 사후관리체계 강화</li> <li>○ 자체생산 부품의 다용도화 개발 및 사업화 추진                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다기능 차온제어기, 보수용 배관재 및 배관이음쇠, Support Frame &amp; Channel</li> </ul> </li> <li>○ OEM 방식의 국내업체 제휴 추진</li> </ul>
산업화(3차)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미국 인증기관(SRCC) 인증 획득 및 원추형 태양광-열 복합(CPV/T) 집광시스템 및 건조장치 수출 추진</li> <li>○ 사업추진 결과 및 사업성 분석을 통해 제품모델 다양화</li> </ul>

## 제 2 절 연구개발과제의 대표적 연구실적

### 1. 국외학술지: 3건(\*: 교신저자 또는 제1저자)

- 가. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee\*, 2016. Thermal performance comparison of line- and point-focus solar concentrating systems: Experimental and numerical analyses. *Solar Energy* 133 (2016): 44-54. (SCI)
- 나. Gwi Hyun Lee\*, M. Imtiaz Hussain. 2016. Numerical Thermal Analysis of Variable Pitch Heat Exchangers for a Solar Storage Tank. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering* 7(2): 123-125. (SCI)
- 다. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee, Jun-Tae Kim. 2017. Experimental validation of mathematical models of identical aluminum and stainless steel engineered conical solar collectors. *Renewable Energy* 112: 44-52. (SCIE)

### 2. 국외학술회지: 6건(\*: 교신저자)

- 가. J.Y. Hwang, M.S. Na, M. I. Hussain, K.T. Lim, and G.H. Lee\*. 2016. Comparative studies of conical solar collector with and without glass tube. 3th International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi2016): 166-170.
- 나. M.S. Na, J.Y. Hwang, M.I. Hussain and G. H. Lee\*. 2016. Thermal performance of solar water heater based on conical shaped concentrator. 3th International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi2016): 467-472.
- 다. Joon Yeal Hwang, Mun Soo Na, Gwi Hyun Lee\*. 2016. Numerical Analysis on Performance of Concentrated Conical Solar System Using Computational Fluid Dynamics. 2016. The 13th International Joint Symposium between Korea and Japan: 70.
- 라. Mun Soo Na, Joon Yeal Hwang, Gwi Hyun Lee\*. 2016. Comparison Analysis of Conical Solar Concentrators with Different Conical Angles. The 13th International Joint Symposium between Korea and Japan: 71.
- 마. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee, and Jun-Tae Kim. 2017. Simulation and Model Validation of a Concentrated Photovoltaic Thermal System. 2017 Global Photovoltaic Conference: 23.

바. Gwi Hyun Lee\*, Mun Soo Na. 2017. Performance Evaluation of Conical Solar Concentrator System with Different Flow Rate. 19th International Conference on Agricultural, Biotechnology, Biological and Biosystems Engineering

3. 국내학술회지: 8건(\*: 교신저자)

- 가. 황준열, 나문수, M. Imtiaz Hussain. 이귀현\*. 2016. 원추형 태양열 집광기의 흡수기 열전달 해석. 한국농업기계학회 2016년 춘계학술대회 논문집 21(1): 28-29.
- 나. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee\*. 2016. **Economic Feasibility of the CPVT System as a Substitute for Auxiliary Energy for Greenhouse Heating.** 한국농업기계학회 2016년 춘계학술대회 논문집 21(1): 95-96.
- 다. 나문수, 황준열, 이귀현\*. 2016. 축열조 용량에 따른 원추형 태양열 집광기의 집열효율 분석. 한국농업기계학회 2016년 춘계학술대회 논문집 21(1): 249-250.
- 라. 나문수, 황준열, 이귀현\*. 2016. 유량 변화에 따른 원추형 태양열 집광기의 집열효율 분석. 한국농업기계학회/한국정밀농업학회 2016년 추계학술대회 논문집: 36.
- 마. 황준열, 나문수, 이귀현\*. 2016. 원추형 태양열 집광기의 실험 및 수치적 성능분석. 한국농업기계학회/한국정밀농업학회 2016년 추계학술대회 논문집: 37.
- 바. 나문수, 이귀현\*. 2017. 원추형 집광기를 이용한 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발. 한국농업기계학회/발농업기계개발연구센터 2017년 춘계 공동학술대회 초록집 22(1): 124.
- 사. 황성근, 나문수, 우성재, 이주희, 이귀현\*. 2017. 흡수기 도색 여부에 따른 원추형 집광기 집열효율 분석. 한국농업기계학회/발농업기계개발연구센터 2017년 춘계 공동학술대회 초록집 22(1): 125.
- 아. 나문수, 황성근, 이귀현\*. 2017. 원추형 태양열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치. 한국농업기계학회/농업생산 무인자동화연구센터 2017년 추계 공동학술대회 초록집 22(2): 51.

4. 특허: 2건 출원.

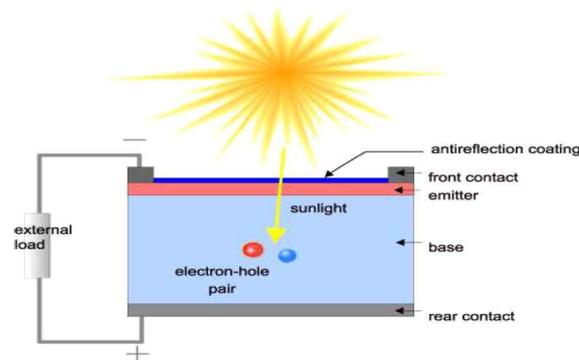
- 가. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 원추형 반사판을 이용한 태양광열 복합 시스템, 출원일: 2016. 10. 19, 출원번호: 10-2016-0135904
- 나. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 원추형 태양광열 복합 시스템을 이용한 에너지 자립형 건조설비, 등록일: 2017. 12. 28, 출원번호: 10-2017-0182608

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 다중접합 태양전지 기술

#### 1. 태양전지의 원리

태양전지는 크게 태양열 전지와 태양광 전지로 나눌 수 있다. 태양열을 이용하여 터빈을 회전시키는 데 필요한 증기를 발생시키는 장치는 태양열 발전 분야(solar thermal electricity)이고, 태양빛(photons)을 반도체의 성질을 이용하여 전기에너지로 변환시키는 장치가 태양전지 분야(photovoltaic solar cells)이다. 태양광 전지의 작동원리는 전기에너지를 빛 에너지로 변환시키는 발광 다이오드(light emitting diode, LED)나 레이저 다이오드(laser diode)와 반대라고 생각하면 된다. [그림 6-1]은 태양전지의 변환 원리를 보여주고 있다.



[그림 6-1] 태양전지의 광전 변환 원리

태양전지 내에서 빛에 의한 전류 생성은 두 과정에 의해 이루어진다. 첫 번째 과정은 입사광자(incident photon)의 흡수에 의한 전자-정공쌍(EHP:Electron-Hole pair) 생성이다. 입사광자의 에너지가 반도체의 대역폭(band gap)보다 큰 경우 전자-정공쌍이 생성된다(유석주, 2008)

그러나 이들 전자(p-형 물질 내)와 정공(n-형 물질 내)은 준안정상태(meta-stable state)에 있으므로 재결합하기 전에 평균적으로 소수캐리어 수명시간 동안만 존재할 수 있다. 만일 캐리어가 결합하게 되면 빛에 의해 생성된 전자-정공 쌍은 없어지며, 더 이상의 전류 또는 전력도 발생할 수 없다.

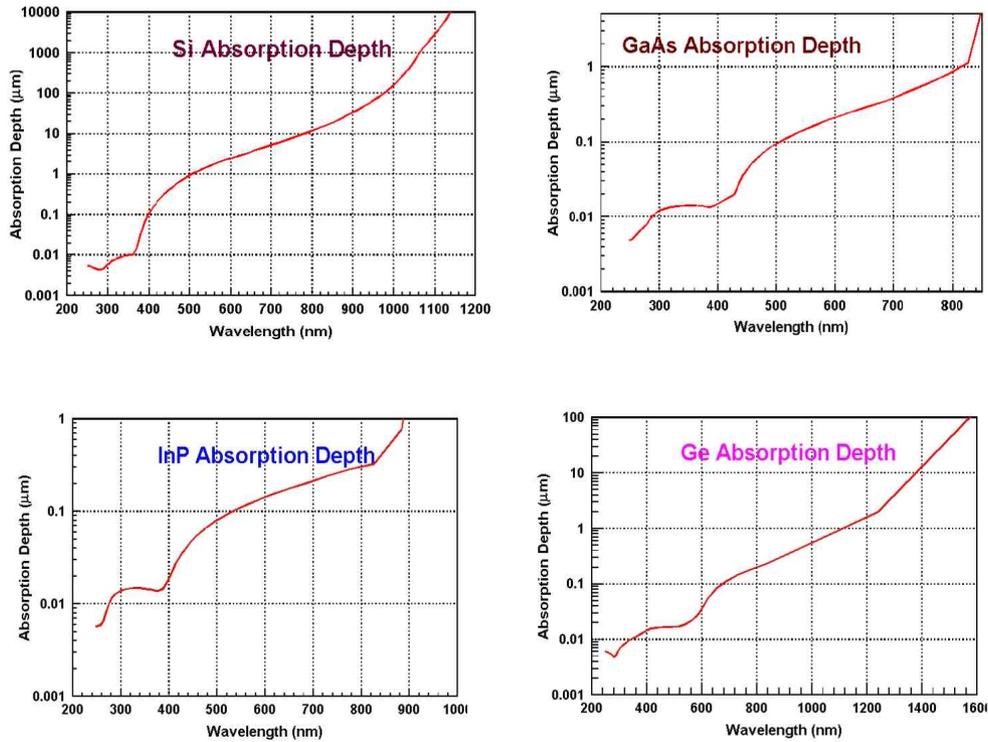
두 번째 과정은 p-n 접합에 의한 이들 캐리어의 수집이다. 캐리어들은 p-n접합에 존재하는 전기장의 영향으로 서로 분리되고 전극으로 수집되어 재결합이 방지된다. 만일 빛에 의해 생성된 과잉 소수 캐리어(p-형 반도체에서는 전자, n-형 반도체에서는 정공)가 재결합하기 전에 p-n접합(정확히는 공간전하층의 끝)에 도달한다면 이들은 내부전계에 의해 접합을 가로질러 반대편으로 휩쓸려 내려갈 것이다. 태양전지의 에미터와 베이스가 서로 연결되어 있는 경우(예를 들어 태양전지가 단락되어 있는 경우), 빛에 의해 생성된 캐리어(또는 광생성 전류)는 외부 회로에 전력을 공급한다.

한편, 태양전지를 제작할 때 대개 p-형 재료를 광흡수체로 사용하는데, 이것은 전자의 이동도가 크기 때문에 p-형에서 생성된 전자가 접합까지 확산한 다음 내부 전계에 의해서 n-형으로 이동해 가는 비율이 높기 때문이다. 그리고 빛에 의해 생성된 캐리어의 수집 그 자체만으로는 전력을 생산할 수 없다. 전력을 생산하기 위해서는 전류뿐만 아니라 전압도 발생되어야 한다. 태양전지 내에서 광기전력 효과(photovoltaic effect)라 알려진 과정에 의해 전압이 발생된다.

광기전력 효과란 금지대 폭이  $E_g$ 인 금속-반도체 혹은 p-n 접합에 빛을 조사시킬 때,  $E_g$  보다 큰 에너지를 가진 입사광자에 의해서 전자-정공 쌍이 생성되어 접합 양단에 광기전력(또는 전위차)이 발생하는 현상이다. 태양전지 출력전압의 극성은 소자의 순방향 바이어스와 같은 방향이며, 광전류는 암(dark)시 소자를 통해 흐르는 순방향 전류와 반대방향이다

빛이 흡수되어 캐리어를 생성하는 과정을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 반도체 표면에 입사되는 광자는 표면에서 반사되지 않으면 반도체 안으로 흡수되거나 투과되며, 흡수된 광자에 의해 전자가 가전자대에서 전도대로 이동한다. 광자가 흡수되거나 투과되는지를 결정하는 핵심 요인은 광자의 에너지이다. 광자에너지( $E_{ph}$ )가 밴드갭에너지( $E_g$ )보다 작은 경우는 반도체와의 상호 반응이 매우 약하여 반도체가 마치 투명한 것처럼 통과해버린다. 광자에너지( $E_{ph}$ )와 밴드갭에너지( $E_g$ )가 같은 경우는 하나의 전자-정공 쌍을 생성할 정도의 에너지로 매우 효율적으로 흡수된다. 그리고 마지막으로 광자에너지( $E_{ph}$ )가 밴드갭에너지( $E_g$ )보다 큰 경우는 광자들이 매우 강하게 흡수되며 가전자대와 전도대로 분리되었던 전자와 정공은 서서히 밴드단으로 이동하면서 열에너지를 방출한다.

빛의 흡수는 파장과 재료의 두께에 따라 달라진다. 흡수 깊이는 빛이 초기 세기의 36%로 줄어들 때까지 재료 속으로 침투해 들어간 거리로 나타내며 에너지가 높은 빛은 에너지가 낮은 빛보다 파장이 더 짧은데 에너지가 낮은 빛은 잘 흡수가 되지 않고 흡수 깊이가 더 크다. [그림 6-2] 반도체 재료에 따른 흡수깊이를 보여주고 있다(Christiana Honsberg, Stuart Bowden, 2006).



[그림 6-2] 반도체 재료에 따른 흡수 깊이

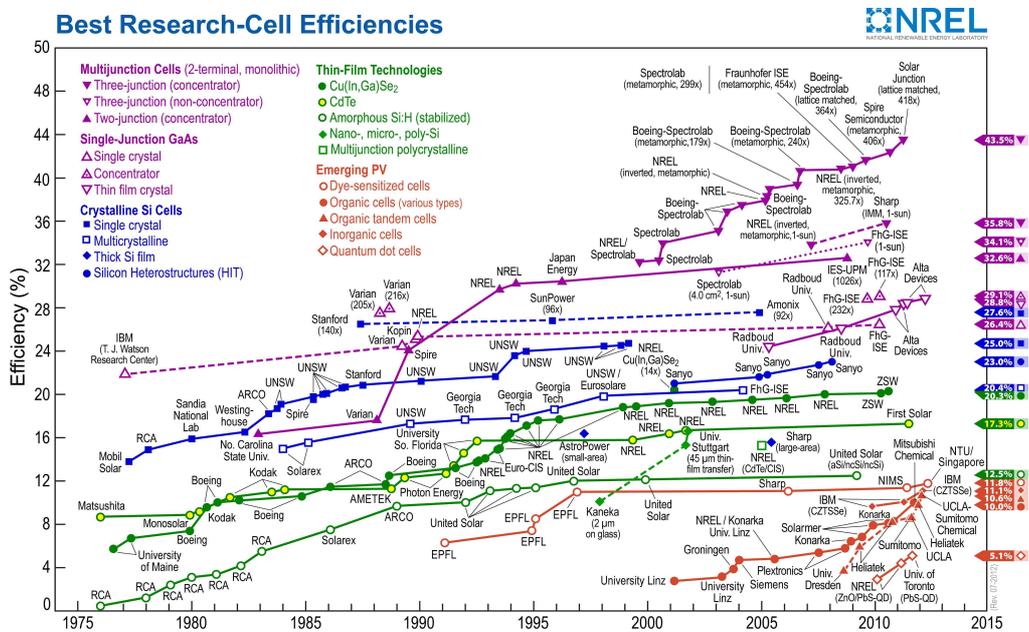
## 2. 다중접합 고집광 태양전지

### 가. 다중접합 셀의 종류 및 특성

화합물 반도체 태양전지는 사용 물질에 따라 III-V족, II-III-VI족, 그리고 II-VI족 태양전지로 구분할 수 있다. 이 중에서 II-III-VI족 태양전지로는 CIGS(Cu(In,Ga)Se)가 대표적인 물질이고, II-VI족 태양전지로는 CdTe가 대표적이다. GaAs, InGaP를 기반으로 하는 III-V족 화합물 반도체 태양전지의 특징은 직접 천이형 밴드갭을 가지고 있어 기존 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 높은 장점을 가지고 있으며, 공유결합을 하고 있기 때문에 우수한 물성을 가지고 있다. 화합물 반도체인 GaAs는 이미 태양전지보다 훨씬 복잡한 구조인 반도체 레이저 분야에서, 극단적인 조건에도 높은 신뢰성을 보이는 것으로 입증되었다. III-V족 화합물 반도체 태양전지는 텐넬정선 기술을 이용하여 다양한 흡수 대역을 가지는 태양전지를 monolithic하게 적층할 수 있어, 단일접합(single junction) 구조 대신 한 단계 진보된 다중접합(multi-junction) 탠덤(tandem) 구조의 태양전지를 만들 수 있다. 이러한 탠덤 구조의 III-V족 태양전지는 서로 다른 밴드갭을 갖는 물질을

MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition)를 사용하여 에피 성장하는 기술로 만들며, 적층하여 태양광의 대부분의 스펙트럼을 효율적으로 사용하는 것이 가능하기 때문에, 50% 이상의 초고효율 태양전지를 개발할 수 있는 가능성을 가지고 있다(오병두, 2008, Daniel, 2012).

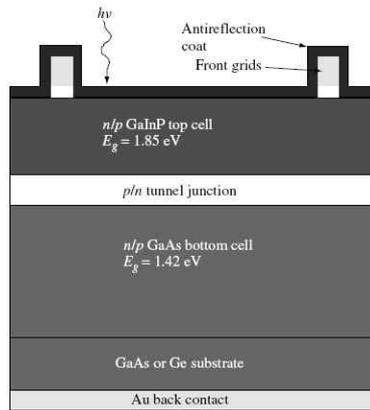
III-V족 화합물 반도체 태양전지는 1980년 중반부터 개발이 시작되었고, 1990년 탠덤(tandem) 셀 개발로 높은 효율을 얻었다. 그 이후 III-V족 화합물 반도체 태양전지 효율은 매년 약 1%의 빠른 효율 향상을 보이고 있으며, 2007년에는 Spectrolab에서 격자부정합(metamorphic) 성장기법을 이용한 InGaP/GaAs/Ge 적층형 태양전지를 이용하여 효율 40.7% (240배 집광시)를 달성하였다. [그림 6-3]은 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 2012년 발표한 태양전지의 최대 효율의 연도별 발전 현황을 보여주고 있다.



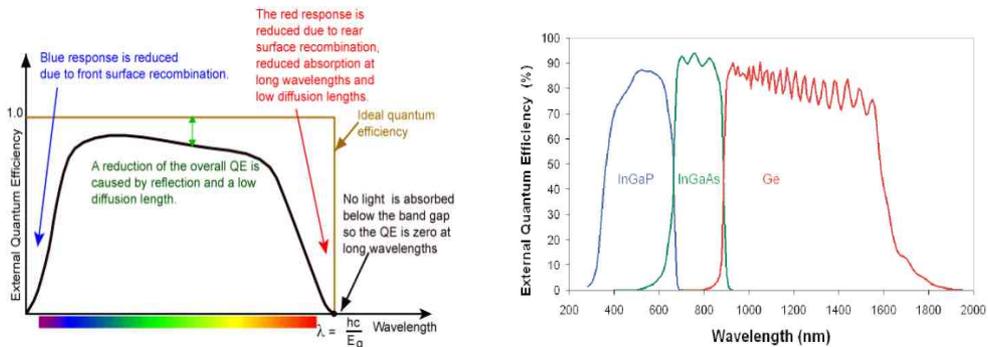
[그림 6-3] 2012년 NREL 발표 태양전지 최고 변환 효율

III-V족 태양전지가 높은 효율을 가질 수 있는 이유는 다중접합(multi-junction) 탠덤 셀 구조를 갖고 있기 때문인데, 이러한 구조가 높은 변환 효율을 갖는 이유는 다음과 같다. [그림 6-4]에서와 같이 세 개의 층을 적층할 경우에 가장 밴드갭이 큰 물질이 맨 위에 위치하고, 중간 밴드갭을 갖는 물질이 가운데, 그리고 가장 밴드갭이 작은 물질이 맨 아래에 위치하도록 한다. 이 경우 맨 위의 셀에서 태양광의 짧은 파장 부분(밴드 갭 에너지보다 큰 부분)의 스펙트럼을 흡수하고 나서, 그 다음에

중간 밴드갭을 갖는 물질이 중간 파장 부분의 스펙트럼을 흡수하고, 마지막으로 가장 짧은 밴드갭 물질이 세번째 스펙트럼 부분을 흡수하여, 태양광의 전체 스펙트럼을 여러 부분으로 나누어 효율적으로 사용한다. 이로 인하여 다중접합 탠덤 구조의 셀이 단일접합의 셀보다 훨씬 높은 변환효율을 얻을 수 있다. [그림 6-4], [그림 6-5]에서는 세 개의 다른 밴드 갭을 갖는 물질을 적층하여 제작된 탠덤 구조와, 이 구조의 각층에서 사용되는 태양광 스펙트럼의 부분을 보여주고 있다(KENSUKE NISHIOKA et al., 2010).



[그림 6-4] III-V 족 화합물 반도체 탠덤 구조

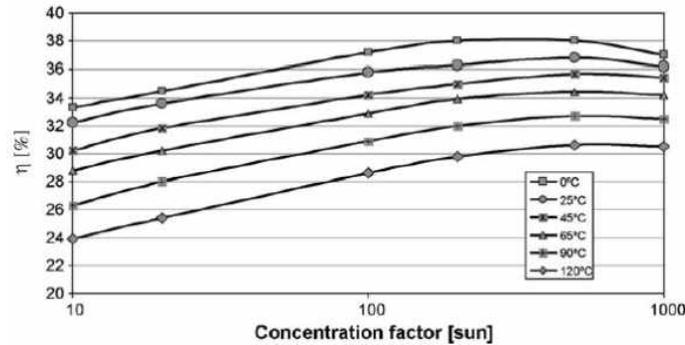


[그림 6-5] 실리콘 태양전지와 다중접합 태양전지의 파장대역별 광자 효율

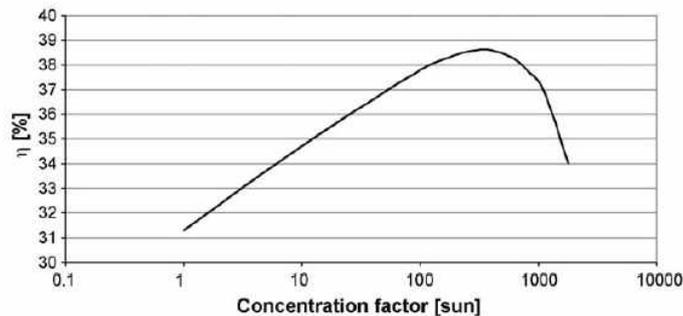
(나) CPV 셀의 효율 특성

III-V 족 삼중접합 셀의 효율에 영향을 미치는 요소 중 중요한 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다. 우선 온도 특성으로 내열성이 좋고 온도 상승에 따라 약 0.05%/°C 효율이 감소하여 실리콘 계열의 셀보다는 온도의 영향을 적게 받지만 집광비에 따

라 셀의 온도 차이가 크기 때문에 효율에 중요한 요인으로 작용한다. 그리고 집광비에 따라서도 효율은 변화는데 현재 100X~1000X 집광 할 때 최고 효율을 보이는 셀들이 출시되고 있다. [그림 6-6]은 Spectralab의 CDO-100 셀에 대한 온도별 집광률에 따른 효율 특성 그래프이고, [그림 6-7]은 Emcore의 CJT 셀에 대한 25°C에서 측정된 집광률에 따른 효율 특성이다(Zubi et al. 2009).

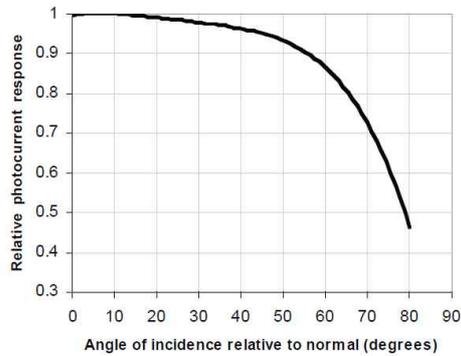


[그림 6-6] Spectralab의 CDO-100 셀에 대한 온도별 집광비에 따른 효율 특성



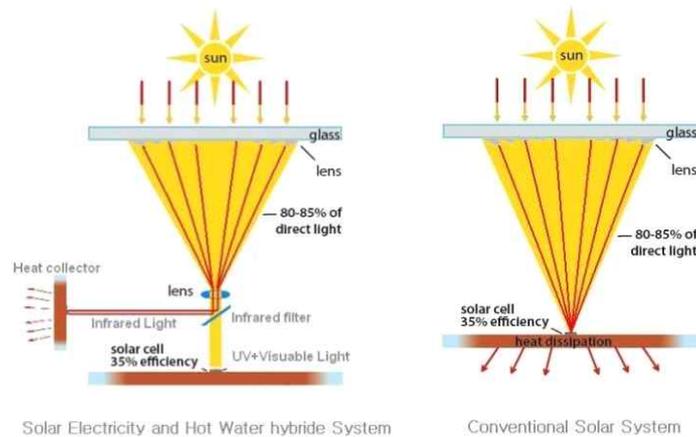
[그림 6-7] Emcore의 CJT 셀에 대한 25°C에서 측정된 집광비에 따른 효율 특성

또한 [그림 6-8]에서와 같이 셀에 조사되는 각도에 따라 광전류 응답 특성이 변함으로 가능한 셀에 수직으로 조사되어야 효율을 높일 수 있으며 그 외에도 표면의 코팅 상태, 재료의 두께와 적층구조, 재결합 비율 등 태양전지 효율에 영향을 미치는 수많은 요소들이 있다.



[그림 6-8] 입사각과 셀 출력과의 관계

방향을 달리하여 태양에너지의 이용 효율을 높이기 위해 그림[6-9]와 같은 복합 시스템을 구성하여 전력 생산 및 온수 생산을 동시에 할 수 있는 시스템들도 연구 개발되고 있다(도규형 등, 2011).



[그림 6-9] 적외선 필터를 사용한 태양광-열 복합시스템

## 제 2 절 태양열 집광기술

태양열의 집열은 태양복사에너지를 수집, 이용하기 위한 수단으로 집열장치에 의하여 이루어진다. 태양열 집열장치는 집열온도에 따라 저온용, 중온용, 고온용으로 분류되며(Table 6-1), 이에 따라 집열장치의 형태 및 집열 방법이 다르다. 저온용 태양열 집열기는 대체적으로 자연 순환형과 강제 순환형으로 구분된다. 자연 순환형은 작동유체를 순환시키는 쉘이나 펌프와 같은 구동장치 없이 열사이판(thermosysphon) 현상에 의하여 순환하는 장치를 의미하며, 주로 건물의 구조물에

이용하거나, 주택 등에 널리 이용된다. 강제 순환형은 웬이나 펌프를 통하여 작동유체를 강제 순환시키는 시스템을 의미하며, 일사광선에 의해 얻어진 에너지를 열에너지로 변환하여 축열조에 저장한 후 온수, 난방, 산업공정, 열발전, 태양로 등에 이용된다. 저온용 태양열 집열기는 자연 순환형에 속하며, 집열장치 면적과 흡수기의 면적이 비슷하고 일사광선을 고밀도로 집광하는 장치를 따로 갖출 필요성이 없다. 저온용 태양열 집열기의 형태는 평판형 집열기와 진공관식 집열기가 대표적이다. 중온용 태양열 집열장치는 일사광선을 고밀도로 집광해서 100~300°C사이의 온도를 얻는 시스템으로 PTC (Parabolic Trough Concentrator)형, CPC (Compound Parabolic Concentrator)형 집열기가 대표적이다. 고온용 태양열 집열기는 중온용 태양열 집열기와 마찬가지로 일사광선을 고밀도로 집광시키는 시스템이지만, 집광비에 따른 집열온도의 차이점을 이용하여 Dish형, Power Tower와 같이 300°C 이상으로 작동유체의 온도를 높이는 집열 시스템을 일컫는다.

Table 6-1 Classification of solar collector

Division	Low temperature system	Medium temperature system	High temperature system
active temperature range	less than 100°C	100~300°C	over 300°C
Type of collector	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flat plate</li> <li>■ Vacuum tube type</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ PTC</li> <li>■ CPC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dish</li> <li>■ Power Tower</li> <li>■ Solar furnace</li> </ul>

### 1. 평판형 태양열 집열기(Flat Plate Solar Collector)

구조가 비교적 간단하며 초기 설계 및 시공비가 낮고 간단한 조작과 보수관리 뿐 아니라 용이성 및 반영구적이라는 장점들을 가지고 있는 평판형 태양열 집열기는 가정용 난방, 온수를 위한 목적으로 가장 보편화되어있다. 평판형 태양열 집열기는 Figure 6-10과 같이 최상단부에는 빛을 투과시키며 전도 및 대류열손실을 낮출 수 있는 투과체(이중 투과체), 그 하단에는 전달된 열에너지를 흡수하는 흡수판, 흡수된 열에너지를 작동유체(기체)에 전달하기 위한 파이프, 외부로의 열손실을 최소화하기 위한 단열재 및 집열기 고정을 위한 프레임 순으로 구성되어있다. 투과체는 투과율이 높고 흡수율이 낮으며 열전도율이 상대적으로 낮은 투명 플라스틱, 카보네이트 등을 주로 사용한다. 흡수판은 흡수율이 높고 방사율이 낮으며 열 전도성이 뛰어난 블랙 크롬 도금을 한 동판, 구리, 알루미늄, 스테인리스 등과 같은 재질을 사용한다. 단열재의 경우 폴리우레탄 폼과 같은 단열성이 우수한 재료를 사용하여

집열기의 열손실을 최소화 한다. 대부분의 평판형 태양열 집열기는 일반적으로 고정형 시스템 형태를 가지므로 태양 추적 장치를 필요로 하지 않으며, 축열부(축열조)와 이용부를 선택적으로 구성할 수 있다. 축열부는 자연 순환형과 강제 순환형으로 나눌 수 있으며 자연 순환형의 경우 집열효율이 떨어지는 반면 순환펌프를 위한 전력 소모가 없고, 강제 순환형은 집열효율이 비교적 높은 반면 순환펌프를 위한 전력 공급이 필요한 단점이 있다.

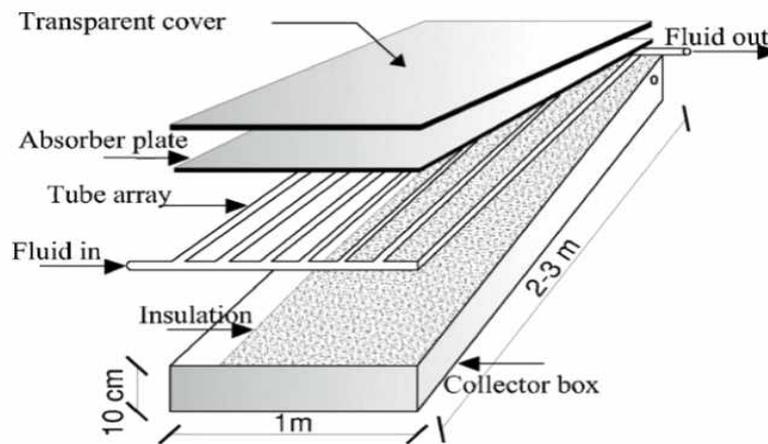


Figure 6-10. Cross-section and isometric view of flat plate solar collector.

## 2. 진공관형 태양열 집열기(Evacuated Tube Solar Collector)

진공관형 태양열 집열기는 평판형 태양열 집열기와 거의 동일한 집열방식을 취하나 흡수관을 진공유리관 내부에 위치시켜 대류 열손실을 최소화한다는 차이점 때문에 작동유체의 온도가 높아질수록 평판형 태양열 집열기보다 높은 집열효율을 보인다. 진공관형 태양열 집열기는 일반적으로 2가지 형태로 나눌 수 있으며, 첫 번째 형태는 Figure 6-11(a)와 같이 태양복사에너지가 진공관을 통과함과 동시에 U자형 파이프를 뜨겁게 데우면 파이프 내부를 순환하는 물이 U자형 파이프로부터 열을 직접 전달받는 방식이다. 두 번째는 진공관 내부에 Heat pipe를 위치시켜 순환하는 물에 간접적으로 열을 전달하는 방식이다. 태양복사에너지가 Heat pipe 한 끝에 도달하여 Heat pipe 내부에 증류수, 에탄올, 아세톤과 같은 작동유체를 가열하면 액체가 증발하여 관의 중앙부를 지나 다른 끝(냉각 쪽)으로 이동한다. 냉각 쪽으로 이동한 작동유체는 외부표면을 지나는 물에 의해 응축되어 관 내면의 벽을 지나 모세관력에 의하여 자동적으로 되돌아오는 과정을 반복하며 외부 물에 열을 전달한다 (Figure 6-11 (b)).

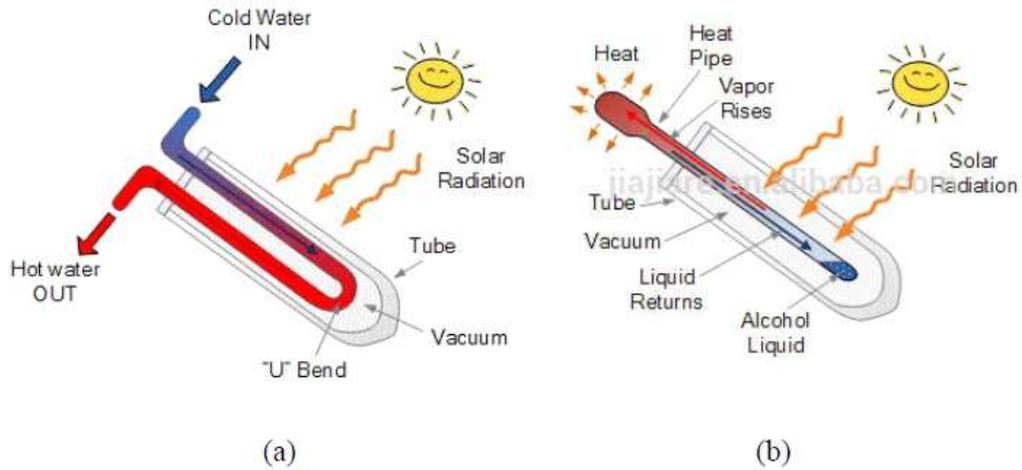


Figure 6-11. (a) Evacuated tube solar collector using U-pipe (b) Evacuated tube solar collector using heat pipe.

### 3. 포물선형 집광기(Parabolic Trough Concentrator, PTC)

포물선형 집광기는 Figure 6-12와 같이 반사판, 흡수관 및 추적시스템(sun sensor 및 driving device)으로 구성되어있다. 포물선형 집광기의 집열 원리는 포물선 형상의 반사판을 이용하여 중앙 흡수관에 직달일사량(beam radiation)을 고밀도 선 집광(line focus)시켜 흡수관 내부에 순환하는 작동유체로 전달하는 시스템이다. 일반적으로 포물선형 집광기는 직달 일사량을 사용하기 때문에 추적시스템을 갖추지만, 설치면적, 설치비용 및 구동을 위해 사용되는 전력 등의 문제로 인하여 2축(고도각 및 방위각) 추적시스템 보다 1축(고도각) 추적시스템이 보급화 되어있다. 반사판은 거울, 스테인리스 미러, 알루미늄 등 반사율이 높은 재료가 사용되며 흡수관은 진공관이나 흑연 도금된 강관, 스테인리스 등 열전도율이 높고 외부의 손실을 감소시킬 수 있는 재료가 이용된다. PTC는 일반적으로 15~20배의 집광률부터 대규모 시스템인 경우 20~30배 집광률로 규모에 따라 온수, 난방, 증류, 독소배출, 산업공정 열, 열 발전 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

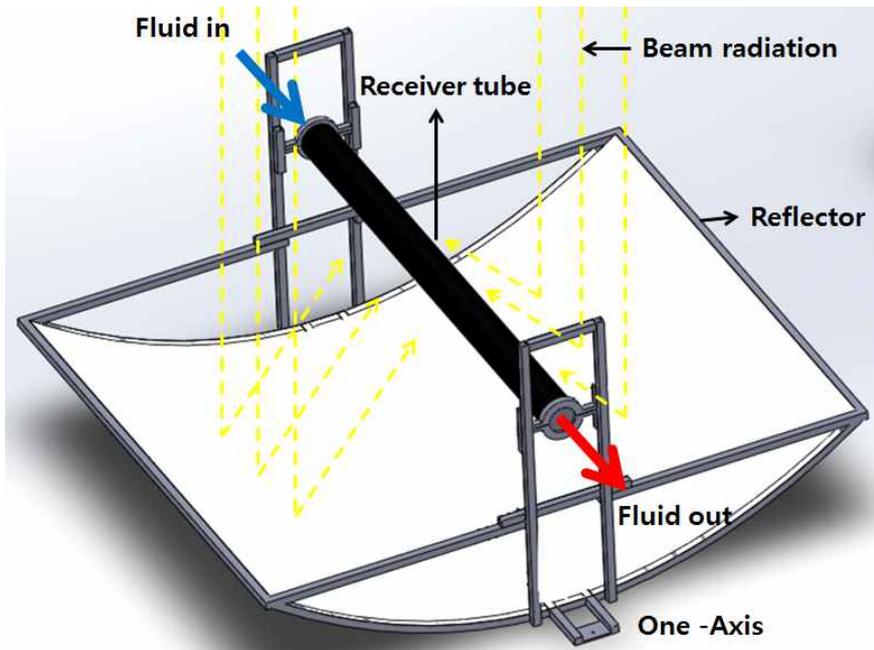


Figure 6-12. Schematic diagram of parabolic trough concentrator.

#### 4. 복합포물선 집광기(Compound Parabolic Concentrator, CPC)

복합포물선 집광기는 광화학적 분야에서 다양하게 적용되며, 200°C 이하의 온도로 집열하기 위해 보편적으로 사용되고 있는 태양열 집열기 중 하나이다. 복합포물선 집광기는 Figure 6-13과 같이 유리관내 하단부분에 포물선 형태의 반사판이 있으며 그 가운데 흡수관이 위치해있는 구조이다. 여기서, 집열기로 입사되는 태양 빛은 직달일사뿐 아니라 산란일사도 포함하며, 하단에 위치한 반사판은 집열기 하부를 통하여 발생하는 열손실을 감소시키는 역할을 수행한다. 집열기로 입사된 태양 복사에너지는 하단부 포물선 형태인 반사판의 반사각도에 따라 흡수관으로 집광되어 흡수관 내부의 작동유체에 의하여 열에너지로 전환된다. 태양 추적 장치 없이 유리관 내 흡수관으로 많은 태양복사에너지를 집광시키기 위해 반사판의 적절한 포물선 형태를 설계하는 것이 중요하다.

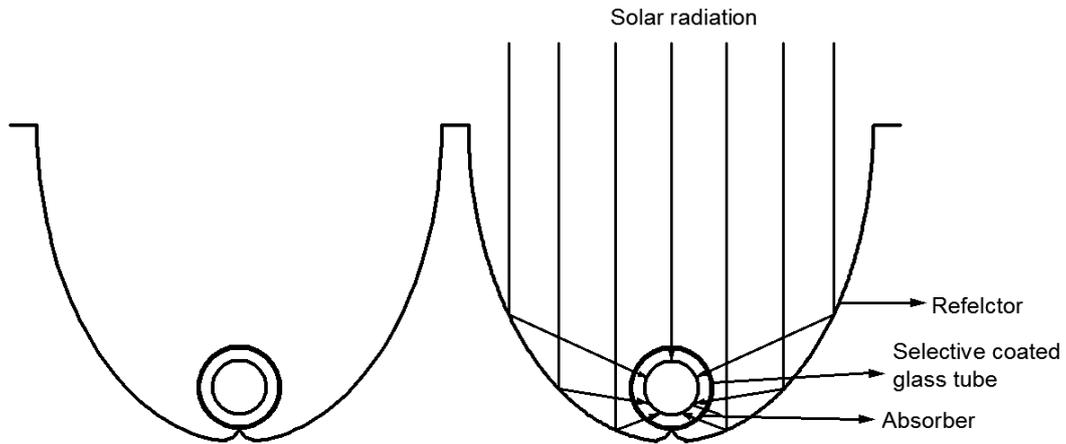


Figure 6-13. Cross section geometry of compound parabolic concentrator.

#### 5. 접시형 태양열 집열기(Dish Solar Collector)

접시형 태양열 집열기는 접시모양의 반사판을 이용해 입사된 태양복사에너지를 한 점으로 집광시켜 운동에너지를 얻는 집광기이다. 반사판의 각도에 따라 흡수기를 위치시킬 초점거리가 변하며, 반사판 재료의 반사율에 따라 집광기 성능에 막대한 영향을 미치므로 반사판 설계 및 재료 선정에 있어 신중해야 한다[31]. 일반적으로 접시형 태양열 집열기는 Figure 6-14와 같은 구조를 가지며, 반사판에 의해 집광되는 한 점에 흡수기의 역할을 하는 Stirring engine (converting unit)을 중앙 정면에 위치시키고, 집광된 열에너지를 운동에너지로 전환함과 동시에 다시 운동에너지를 이용하여 전기에너지를 생산한다. 최대 에너지를 생산하기 위해 2축(고도각 및 방위각) 추적시스템을 갖춰 지속적이며 정확한 집광을 유도하는 것이 중요하다.

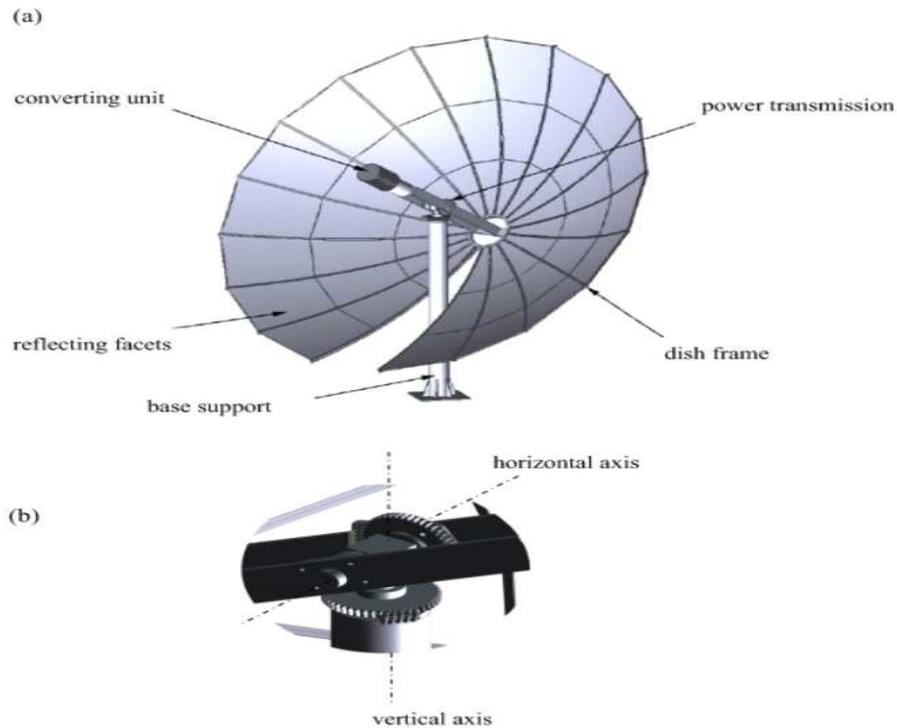


Figure 6-14. Schematic diagram: (a) Dish solar collector and (b) Sun tracking system.

## 6. 타워형 태양열 발전(Solar Power Tower)

타워형 태양열 발전(solar power tower)은 Central receiver tower로도 많이 알려져 있는 대규모 집광시스템이다. Figure 6-15와 같이 정 중앙에 솔라 타워가 위치해 있으며 각각의 2축 추적시스템을 갖춘 반사경(heliostat)이 그 주위를 둘러싸고 있는 형태이다. 반사경에 의하여 반사된 태양복사에너지는 솔라 타워 최상단에 위치한 흡수기로 집광되어 흡수기 내에 증발 작용을 일으키는 작동유체에 에너지를 전달하여 스팀을 발생시키고, 발생된 스팀은 랭킹 사이클이라 불리는 수증기 증발 사이클을 통하여 전력을 생산한다. 물, 공기, 용융염, 오일 등이 타워형 태양열 발전의 작동유체로 사용되며, 각 유체마다 특성을 가지고 있다. 작동유체를 물로 사용할 경우, 스팀을 직접 랭킹 사이클로 보냄으로서 전력을 생산할 수 있기 때문에 열교환기 설비가 필요하지 않다. 반면, 용융염을 사용할 경우 유체의 온도 유지성이 매우 뛰어나기 때문에 이용성이 높지만, 물을 통하여 열 교환이 추가적으로 이루어져야 하기 때문에 별도의 열 교환 시스템이 필요하며, 이는 시스템 설비비용의 증가를 의미한다. 공기의 경우, 공기의 열전도율이 다른 작동유체에 비하여 상대적으로 낮아 효율이 떨어지고, 쿨링을 위한 물이 별도로 필요하지 않기 때문에 물이 부족한 지역에서 사용하기 알맞다.

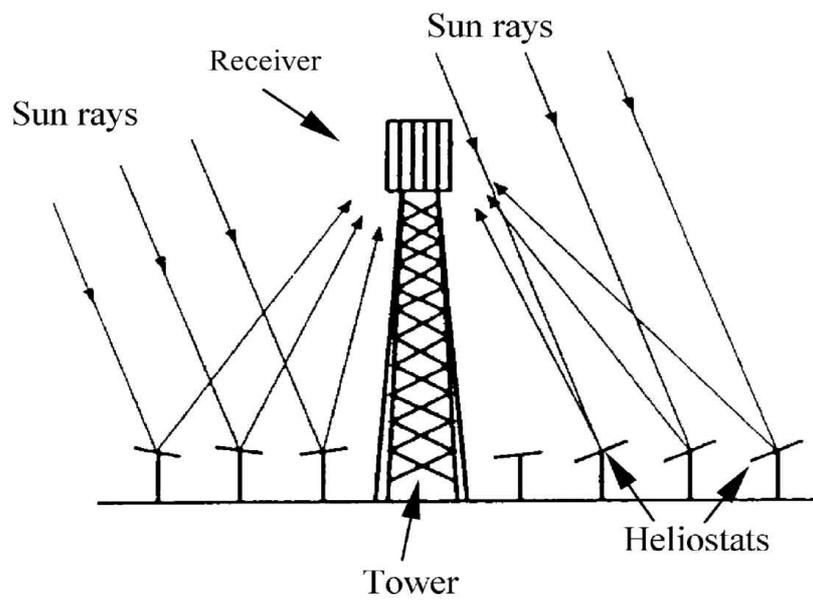


Figure 6-15. Schematic diagram of solar power tower.

## 제 7 장 연구개발결과의 보안등급

코드번호	D-09
○ 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조 의8에 따라 본 연구개발 결과는 일반과제로 분류됨.	

## 제 8 장 연구시설·장비 현황

해당 없음

## 제 9 장 연구실 안전관리 이행실적

### 제 1 절 안전점검

#### 1. 연구실 안전점검

- (1) 개요 : 연구실 내 잠재되어 있는 위험요소의 발견과 개선대책의 수립
- (2) 실시시기 : 2015.12 - 2017.12
- (3) 점검대상 : 연구실 및 실험실
- (3) 점검내용: 연구실 실내 공기의 질(VOC, CO, CO<sub>2</sub>, DUST 등)

#### 2. 일상점검

- (1) 개요 : 연구원이 연구개발 활동 시작 전 연구실 안전 상태를 점검
- (2) 실시시기 : 매일
- (3) 점검대상 : 연구실 및 실험실
- (4) 실시방법: 연구원이 연구실의 상태에 대하여 육안점검을 실시하였고, 특이상이 있을시 안전점검 일지에 기록
- (5) 점검내용: 연구에 활용되는 실험기자재 및 실험재료의 이상 유무, 보호구 점검

### 제 2 절 교육 및 훈련

#### 1. 자체 안전교육 실시요청

- (1) 교육구분: 과제수행에 따른 연구원의 안전 교육·훈련
- (2) 교육방법: 시설관리과에서 제작·배부하는 교재 배부 및 책임교수 주도하여 연 2회 안전교육 수행

#### 2. 온라인 안전교육 실시

- (1) 교육구분 : 정기 교육·훈련
- (2) 교육방법: 연구실에 소속된 연구원(대학 및 대학원 생 연구원)은 연간 12시간의 온라인 교육을 이수하였음

#### 3. 기타 연구실에서 실행한 안전조치 사항

안전보건표지를 부착하였고, 연구수행에 필요한 안전보호구를 확보하였으며, 연구실 실정에 맞게 안전수칙을 마련하였고, 연구실 안전 확보를 위한 연 4회의 정기 회를 개최하였음

## 제 10 장 참고문헌

1. 고헌균, 김용현, 송대빈, & 김만수. 1991. 태양열 건조 시스템에 관한 실험적 연구(I) - 무우절편의 태양열 건조 특성 -. 한국태양에너지학회 논문집, 11(3): 9-20
2. 김진근. 2012. 태양열에너지 산업동향과 경남의 현황. 경남발전, (119): 87-99
3. 김경택, 이덕주, & 박성준. 2012. 실물옵션을 이용한 신재생에너지 R&D의 경제적 가치 및 최적 적용시점 평가. 대한산업공학회지, 38(2): 144-156
4. 김용빈. 2017. 원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석. 에너지경제연구, 16(1): 119-162
5. 김종완, & 박상철. 2016. 의무할당제도 개선을 통한 신재생에너지 산업의 발전 전략. 에너지공학, 25(4): 110-123
6. 도규형, 한용식, 최병일, 김명배. 2011. CPV 냉각용 열분산기 모듈의 열성능에 관한 실험적 연구. 한국태양에너지학회 논문집 31(4): 94-101.
7. 박동우. 2014. 원추형 태양열 집광기의 성능분석 연구. 강원대학교 대학원 석사학위 논문.
8. 오병두. 2008. 고효율 III-V 집광형 태양전지. 물리학과 첨단기술 July/August 2008: 37-41.
9. 유석주. 2008. 고효율 광전지 출력을 위한 지능형 태양 추적 시스템 개발. 원광대학교 대학원. 박사학위논문.
10. 이길동, 조서현, 최영희, 이남호, & 오정무. 1987. Shelf Type 태양열 건조기의 성능평가. 한국태양에너지학회 논문집, 7(2): 30-36
11. 이진원, & 이종원. 1978. 태양열을 이용한 곡물건조기의 시스템에 관한 연구 (I). 한국태양에너지학회 논문집, 1(1): 23-29
12. 이정륜, & 부준홍. 2011. 히트파이프와 용융염을 사용하는 태양열 축열조의 설계. 한국태양에너지학회 학술대회논문집: 86-91.
13. 한원석. 2010. III-V족 화합물 반도체 태양전지의 기술개발 동향 및 전망. 전자부품 2010년 7월호
14. 허주녕, 신지영, 이두호, & 손영식. 2013. 평판형 태양열 집열기의 압력강하 및 열전달 성능 향상에 관한 수치해석적 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 37(4): 316-323
15. 황재홍, 유연태, 송성운, 이재형, & 장길수 (2017). 주요 OECD 국가의 신재생에너지 확대보급 정책과 국내 적용 방안. 대한전기학회 학술대회 논문집: 63-64
16. 황준열. 원추형 태양열 집열 시스템의 성능분석을 위한 실험 및 수치 해석. 강원대학교 대학원 석사학위 논문. 2017

17. Ali A. H. H. 2017. Performance assessment and gained operational experiences of a residential scale solar thermal driven adsorption cooling system installed in hot arid area. *Energy and Buildings*, 138(Supplement C), 271-279
18. Chow. T. T., W. He, and J. Ji. 2006. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy* 80: 298-306.
19. Daniel. 2012. 집광형 태양전지(CPV) 기술 및 시장 전망(2009~2020). SNE 리서치.
20. Imtiaz Hussain M., Lee G H, & Kim J. 2017. Experimental validation of mathematical models of identical aluminum and stainless steel engineered conical solar collectors. *Renewable Energy*, 112(Supplement C): 44-52
21. Imtiaz Hussain M., & Lee G. H. 2014. Thermal performance evaluation of a conical solar water heater integrated with a thermal storage system. *Energy Conversion and Management*, 87(Supplement C), 267-273
22. Imtiaz Hussain M., Ali A., & Lee G. H. 2016. Multi-module concentrated photovoltaic thermal system feasibility for greenhouse heating: Model validation and techno-economic analysis. *Solar Energy*, 135(Supplement C), 719-730
23. Khaled MAHDI and Nadir BELLEL. 2016. Simulation of a conical solar collector for steam generation. *International proceedings of chemical, biological and environmental engineering*, Vol. 91.
24. Visible spectrum. Cecie Starr. 2005. *Biology: Concepts and Applications*. Thomson Brooks/Cole. ISBN 0-534-46226-X.0
25. Texas solar energy society. 2015. *Solar Energy Facts You Should Know*. Available from: <<http://www.txses.org/solar/content/solar-energy-facts-you-should-know>>.
26. Toğrul İ T, & Pehlivan D. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3): 209-216
27. Türk Toğrul İ, & Pehlivan D. 2003. The performance of a solar air heater with conical concentrator under forced convection. *International Journal of Thermal Sciences*, 42(6): 571-581
28. William A. W. 1982. 태양열 집열기의 효율곡선. *태양에너지* 2(1): 59-66.
29. Zambolin E, Del Col D. 2010. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy* 84: 1392-1396.

30. Zhai H, Dai YJ, Wu JY, Wang RZ, Zhang LY. 2010. Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens. *Energy Conversion and management*. 51: 48-55.
31. Zhao C, Youa S, Weic L, Gaod H, Yub W. 2016. Theoretical and experimental study of the heat transfer inside a horizontal evacuated tube. *Solar Energy* 132: 363-372.

<별첨>

## 자체평가의견서

### 1. 과제 현황

			코드번호	D-15	
	과제번호		115063-2		
사업구분	농식품기술개발사업(자유응모과제)				
연구분야	농업동력/에너지		과제구분	단위	
사업명	첨단생산기술개발사업			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	원추형 태양광-열(CPV/T) 복합 집광시스템을 이용한 에너지 자립형 농산물 건조장치 개발		과제유형	응용	
연구기관	강원대학교 산학협력단		연구책임자	이귀현	
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2015. 12. 18 ~ 2016. 12. 17	90,000	30,000	120,000
	2차년도	2016. 12. 18 ~ 2017. 12. 17	90,000	30,000	120,000
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계		180,000	60,000	240,000
참여기업	(주)나우솔리드				
상대국		상대국연구기관			

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2017. 12. 25

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
강원대학교	교수	이귀현

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문가기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	이귀현 (인)
----	---------

## I. 연구개발실적

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

◦ 본 연구 지금까지 개발되어 실용화되고 있지 않는 포물원통형과 접시형 집광기의 복합 개념인 집광효율을 극대화한 원추형 집광장치 및 흡수기 표면의 고 집광 부에 CPV셀을 부착하고 흡수기 내에 열매체를 순환하게 하여 CPV셀 냉각으로 인한 고 효율의 태양광 발전을 가능케 하는 태양열 집열 및 태양광 발전이 동시에 가능한 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 개발하여, 집광시스템으로부터 생산된 에너지를 이용하는 농산물 건조장치 개발 연구로 연구개발 결과의 우수성 및 창의성은 매우 큼.

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

◦ 유류비용의 증가로 에너지난을 겪고 있는 농촌의 에너지원으로 이용함으로써 농업에너지 난을 타개할 수 있을 뿐만 아니라 정부의 적극적 지원 하에 원추형 태양광-열 (CPV/T) 복합집광시스템을 이용한 건조장치를 확대 보급할 수 있을 것임.  
◦ 농업분야 뿐만 아니라 타 분야의 산업적으로 이용이 확대될 수 있어 기술적 우위에 의한 국내 시장 점유율 증가와 수입대체 및 수출에 의한 경제적 이익뿐만 아니라 에너지 절약의 파급 효과가 크게 기대됨.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

◦ 집광형 태양전지(CPV)를 부착한 원추형 태양광-열 복합시스템 개발은 열과 전기 에너지를 동시에 생산할 수 있어 건조장치 뿐 아니라 농업시설물(온실, 축사) 및 농가의 냉난방용 열원으로 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대됨.

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

◦ 본 연구에 참여하는 주관기관 연구원들의 적정한 연구업무와 역할 분담을 통해 본 연구개발을 성공적으로 수행할 수 있었음.  
◦ 참여기업의 연구 인력을 태양광 발전 자체 생산전력 이용 독립형 건조장치 구축 및 고도각 추적을 위한 Slew Drive 설비, 방위각 추적을 위한 Linear Actuator 설비, 고도 및 방위각 축의 DC 모터제어를 위한 컨트롤러 설비에 큰 기여를 하였음.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

○ 본 연구를 통해 특허출원 2건, 국제 학술지 논문발표 3건, 국내외 학술회의 발표 14건, 인력양성 학/석사 7명 배출, 타 연구 활용 1건 등을 달성하여 연구개발 성과는 매우 우수함.

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
원추형집광기 개발	20	100	반사율 96.56%의 알루미늄 판을 이용한 원추형집광기 개발 완료
태양추적장치 및 축열조 설비	10	100	고도 및 방위 2축 정밀 태양추적장치 설비 및 열교환기를 내재한 축열조 설비 완료
단일 및 다 모듈 CPV/T 복합 집광시스템 개발	20	100	CPV셀 부착 원추형집광기 1개 및 4개로 구성된 단일 및 다 모듈 집광시스템 설계 및 설비 완료
원추형 CPV/T 복합 집광시스템 성능 분석	10	100	집광시스템 성능분석 완료: 단일 모듈 원추형 복합시스템 합산효율: 78%(집열효율: 57%, 발전효율:21%), 다 모듈 원추형 복합시스템 합산 효율: 76%(집열효율:56%, 발전효율: 20%)
다 모듈 원추형 복합 집광시스템과 통합된 에너지 자립형 건조장치 설계/제작	20	100	다 모듈 원추형 집광기, 태양추적장치, 축열조, 열교환기, 건조실 일체형 건조장치 설계 및 제작 완료
건조장치 운전성능 및 건조 특성 분석	10	100	건조기 내 설정 건조온도 유지성능 분석 및 농산물 건조특성 분석 수행 완료
복합 집광시스템을 이용한 건조장치 경제성 분석	10	100	건조장치 에너지 경제성분석 및 시스템 설비 수익성과 투자회수 기간 분석 완료
합계	100점		

### III. 종합의견

#### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

◦ 본 연구는 당초 계획대로 단일 및 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템 개발 및 성능평가, 다 모듈 원추형 태양광-열 복합 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치 설계/제작 및 운전 성능 분석과 농산물 건조특성 분석 및 건조장치 경제성 분석 등 전체적으로 연구 수행이 잘 되었음.

#### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

◦ 계획된 연구 성과목표 대비 달성도의 평가가 매우 중요한 것으로 사료됨.

#### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 과제를 성공적으로 완료함으로써 여러 용도처 개발을 단계적으로 추진할 예정이며, 본 과제를 통해 축적된 자체 설계기술, 시스템화기술 및 성능 최적화 기술 등의 Know-How를 바탕으로 차후에는 저비용의 에너지 절약형 농산물 건조장치로의 활용성을 극대화 할 것임.
- 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템을 기업체에 기술 이전하여 기술료징수를 가능케 할 것이며, 기업체의 독자적인 기술 확보 및 기업체의 주 생산기종이 되도록 할 것임.
- 본 연구개발을 통해 Pilot Plant 규모의 원추형 태양광-열 복합시스템을 이용한 건조장치를 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획임.
- 다 모듈 원추형 태양광-열 복합시스템을 이용한 건조장치는 신기술인증 획득을 통해 국가지원 하에 농가 보급을 극대화할 것임.

### IV. 보안성 검토

해당 없음

#### 1. 연구책임자의 의견

#### 2. 연구기관 자체의 검토결과