

발간등록번호

11-1543000-000999-01

농업시설 에너지용 태양 열 및 전기 동시 생산 집광시스템 개발

(Development of Solar Concentrating System for Simultaneous Production
of Solar Heat and Electricity for Energy of Agricultural Facilities)

강 원 대 학 교

농 립 축 산 식 품 부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “농업시설 에너지용 태양 열 및 전기 동시 생산 집광시스템 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2015년 7월 26일

주관연구기관명 : 강원대학교
주관연구책임자 : 이 귀 현
세부연구책임자 : 이 귀 현
연구 원 : 김 성 진
연구 원 : 박 우 람
연구 원 : 후 세 인
연구 원 : 이 명 환
연구 원 : 신 준 호
연구 원 : 박 동 우
연구 원 : 장 영 석
연구 원 : 황 준 열
연구 원 : 박 중 석
연구 원 : 김 부 중
연구 원 : 홍 석 표
연구 원 : 나 문 수
연구 원 : 홍 성 준
연구 원 : 김 다 현
연구 원 : 손 석 규
참여 기업 : 삼양에코너지(주)
연구 원 : 유 정 우
선임연구 원 : 김 평 국
선임연구 원 : 박 훈 서
선임연구 원 : 임 규 현
선임연구 원 : 송 성 탁

요 약 문

I. 제 목

농업시설 에너지용 태양 열 및 전기 동시 생산 집광시스템 개발

II. 연구성과 목표 대비 실적

구분 (연도)	세부연구목표	연구실적	달성도 (%)
1차년도 (2012)	• 프레넬 태양광 집광기 제작	▶ 프레넬 태양광 집광기 설계/제작	100
	• 열 회수를 위한 집광기 흡수기 개발	▶ 열 회수를 위한 흡수기 설계/제작	
	• 단일 CPV 장착 태양광-열 복합 시스템 개발	▶ 단일 CPV 장착 태양광-열 복합시스템 설계/제작	
	• 단일 CPV 장착 태양광-열 복합시스템 성능 분석	▶ 단일 CPV 장착 태양광-열 복합시스템 발전 및 집열 효율분석	
2차년도 (2013)	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 개발	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 설계/제작	100
	• 태양 추적장치 설비	▶ 센서식 2축 태양추적장치 설비	
	• 태양열 축열조 설비	▶ 태양열 축열을 위한 축열조 설비	
	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 성능분석	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템의 집열 및 발전 효율 분석	
3차년도 (2014)	• 온실난방 설비	▶ 온실 설계/제작 및 난방 설비	100
	• 태양광 발전 독립형 시스템 설비	▶ 온실난방용 태양광 발전 독립형 시스템 설비	
	• 온실 내 온습도 모니터링 시스템 구축	▶ 온실 내 온습도 센서 및 모니터링 시스템 설비	
	• 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실의 난방 효율 분석 및 경제성 분석	▶ 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실의 난방성능 분석 및 에너지 경제성 분석	
최종 평가	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 개발	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 설비	100
	• 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실 성능분석	▶ 다 모듈 태양광-열 복합시스템 난방효율 실험 및 분석	
	• 에너지 경제성 분석	▶ 유류비용 대비 경제성 분석	

Ⅲ. 연구개발의 목적 및 필요성

현재, 우리나라의 농업은 에너지 집약형 산업으로 변하고 있다. 그 동안 농업의 생력화를 위해 농업생산 시설의 자동화 시책을 추진해 오면서 온실, 축사, 버섯 재배사, 건조 저장실 등을 중심으로 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하여 농산물 생산비에서 에너지가 차지하는 비중이 매우 높아졌다. 또한 소비자의 선호도 변화에 따라 농업생산도 계절을 초월한 연중공급체제로 전환되고 있으며, 따라서 소비자가 겨울철에도 신선농산물 소비를 원하고 있어 농가는 소비자의 선호에 맞춰 농산물을 생산하기 때문에 유류 사용량은 더욱 증가하고 있다.

그러나 이러한 농업생산성을 지탱하던 축의 일부였던 화석에너지의 지속적인 고갈과 날로 치솟는 에너지비용으로 농업의 경쟁력은 악화되고 있고, 다른 산업과 마찬가지로 신재생에너지의 도입을 서두르지 않을 수 없는 상황에 처해있다. 우리나라의 작물재배는 1970년대까지 대부분이 노지재배에 집중되어 에너지비용이 크게 문제되지는 않았으나, 1980년대 중반부터 온실의 설치면적이 크게 증가하면서 겨울철 난방에너지의 소비가 급증하게 되었다. 특히 채소, 과채류, 화훼류 등의 소비패턴이 계절소비에서 연중소비로 변환되면서 온실면적은 1990년 약 1,500ha에서 2007년 53,036ha로 증가되어 농업용으로 공급되는 석유에너지의 60%이상이 온실의 난방에 소비되고 있으나 유류가격 상승으로 인해 농업 에너지난을 가중시키고 있다. 그러나 에너지원이 한정되어 있는 우리나라의 현실로 볼 때 에너지원의 확보를 위한 대책이 명확하게 수립되어 있지 못한 실정에서 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 더욱이 자본구조가 취약한 농업부문에서는 에너지 가격의 상승이 농업생산비를 증가시키고 있어 농업시설물의 유지 및 운영에 위기를 맞이하고 있다. 우리나라의 에너지자원 확보는 지속적으로 대두될 문제라는데 심각성이 크며, 이 때문에 관계 정부당국에서는 면세유 확대공급, 대체에너지원 개발, 에너지 절약형 설비 시스템 구축 등 다각적인 노력을 강구하고 있다. 그러나 이러한 노력은 단기적이어서는 안 되며, 장기적이고, 항구적인 농업에너지 수급대책이어야 한다. 이를 위해서는 근본적으로 대체에너지 개발, 에너지원의 다양화, 부존자원 이용의 극대화가 이루어지지 않으면 안 된다. 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 실정이다. 지구 환경문제와 관련하여 지구 온난화의 원인 중 화석연료(화석에너지의 단위 열량당 CO₂ 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 기

역도 CO₂ 55%, CFC-11 17%, CFC-12 7%, CH₄ 15%, N₂O 6%)이 가장 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제들의 해결의 일환으로 각국에서는 에너지 절약 기술과 아울러 대체에너지의 개발에 중단 없는 노력을 경주하고 있다. 또한 현대의 주된 에너지원인 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료 매장량에 대한 한계성을 생각해 볼 때 가까운 장래에 닥칠 심각한 에너지난으로 인한 파국을 벗어나기 위하여 폐자원의 에너지이용 및 대체 에너지에 대한 연구 개발이 촉진되고 있고 있다.

특히 농가에서 이용하는 에너지는 석유류 의존 비중이 매우 높으며, 과채류는 가운을 위해 석유류 사용이 95%이고 전기에 의존하는 비중은 5% 내외로 매우 낮아 농업용 대체에너지 개발 및 보급연구가 시급한 실정이다. 원예시설 난방비를 줄이기 위해서는 석유사용 난방장치 이용을 최소화하고 난방에너지를 적게 들여 작물을 재배할 수 있는 에너지 절감기술의 적극적인 활용이 필요하다. 이와 함께 에너지 절약형 시설구조와 자재를 사용하고 난방용 기계장치를 효율적으로 이용하면서 석유를 대체 할 수 있는 신 재생에너지 이용에 많은 관심과 적극적인 도입 등이 종합적으로 이루어질 때 고유가를 극복해 낼 수 있을 것이다.

우리나라는 지리적인 위치와 계절적 기후조건이 연중 태양에너지를 충분히 공급받을 수 있으며 특히 동절기에는 날씨가 건조하고 맑아 태양복사량이 많은 편이어서 태양에너지 이용에 매우 유리하다. 그러므로 대체에너지로서 태양에너지 이용분야의 실용기술을 개발하여 농산업 분야의 에너지원으로의 확대 및 보급이 절실한 실정이다. 따라서 국내외에서 개발이 시도된 적이 없는 프레넬렌즈를 태양광 집광기로 사용하여 고 집광 태양전지(CPV)로 전기를 생산함과 동시에 고온의 열을 효율적으로 생산하는 장치를 개발하여 농업시설 난방 뿐 아니라 건조장치의 열원 및 농가주택 난방 등 다양한 농업 현장 적용분야의 설비에 이용할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구개발의 목표는 집광효율을 극대화한 프레넬 태양광 집광기 요소기술을 개발하고, 집광기의 흡수기 표면에 집광형 태양전지(CPV)를 설비한 태양열 및 전기 동시 생산이 가능한 고효율의 태양광-열 복합시스템(CPV/T)을 설계·제작하여 성능검증 후 농업시설 난방을 위한 실증실험을 통해 개발된 태양광-열 복합시스템(CPV/T)을 농산업분야에 실용화하고자 하는데 있다.

IV. 연구개발 내용 및 범위

1. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

- 가. 집광형 프레넬렌즈 집광기 설계 및 제작
- 나. 열 회수를 위한 집광기의 흡수기 개발
- 다. 흡수기 열손실 최소화 기술개발
- 라. 흡수기 표면에 CPV 셀 부착 기술개발
- 마. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 설계·제작
- 바. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 성능시험 설비구축
- 사. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집열 및 발전효율 분석
- 아. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 최대 발전 및 집열효율 분석

2. 실증 실험용 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발 및 성능분석

- 가. 실증 실험용 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 설계 및 설비 구축
- 나. 태양추적 제어장치 구성 및 설비
- 다. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 구동축 및 태양 추적장치 설비
- 라. 복사열 축열을 위한 축열방법 및 축열조 제작
- 마. 외기 조건에 따른 축열조 축열성능 분석
- 바. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 성능시험 설비구축
- 사. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집열 및 발전효율 분석
- 아. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집광시스템의 최대 효율 작동조건 분석

3. 난방 실증실험 설비구축 및 시스템 효율 평가와 경제성 분석

- 가. 실증실험용 비닐하우스 설계 및 설비
- 나. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템, 축열조 및 온실의 유로 설계·설비
- 다. 온실 내 난방용 열교환기 설비 구축
- 라. 태양광 발전 전기 이용을 위한 독립형 시스템 구축
- 마. 태양광 발전 자체 생산 전력을 이용한 태양광-열 복합시스템 구동 설비 구축
- 바. 비닐하우스 내 온습도 모니터링 시스템 구축
- 사. 비닐하우스 내 온습도 환경 조사
- 아. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 이용 온실의 난방효율 분석
- 차. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 이용 온실의 에너지 경제성 분석

V. 연구개발 결과

1. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

태양광 집열을 위한 집열시스템과 태양열과 전기를 동시에 생산하는 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 그리고 태양광 발전을 위한 CPV 모듈을 제작하여 성능실험을 수행하였고 결과를 상호 비교한 후 CFD 해석을 통하여 결과의 타당성 및 정확성을 확인하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 효율에 영향을 미치는 요소들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가. 태양광 집열시스템 성능분석 결과

SOG 타입의 프레넬 렌즈로 집열기를 구성하여 입구온도와 유량을 변수로 집열 성능 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 집열시스템에서 집광 영역의 흡수율은 높이고, 흡수기 주변의 대류에 의한 손실률은 줄여야 효율을 높일 수 있는데, 유량이 많아지면 흡수율도 높아지지만 손실율도 함께 높아짐으로 시스템에 따라 최고의 효율을 낼 수 있는 임계 유량이 존재하며 본 시스템에서는 2l/min 전후가 임계 유량으로 확인되었다.
- (2) 유량에 관계없이 열매체 입구 온도가 상승하면 주변 온도와의 차이가 커지고 손실이 증가하여 효율이 감소한다.
- (3) 유량이 증가할수록 효율 방정식의 기울기가 증가함으로 시스템을 운영하는 주변 온도와 열매체 온도 차이에 따라 높은 유량(4l/min)에서 효율이 가장 높게 나오거나 가장 낮게 나올 수 있다.
- (4) 기후 조건에서 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 외기온도와 풍량으로 흡수관 주변의 단열처리나 아크릴을 이용한 바람막이는 효율 상승에 중요한 역할을 한다.

나. 태양광-열 복합시스템 성능분석 결과

집열시스템의 집광영역에 CPV 셀을 부착하여 태양광-열 복합시스템을 구성하였고, 집열효율과 발전효율 그리고 합산효율에 대하여 실험 및 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 복합시스템도 집열 성능에서 임계유량이 존재하며 본 시스템에서는 3l/min 전후가 임계유량이다. 또한 임계유량은 시스템의 구성과 운영 환경에 따라 달라질 수 있다.

- (2) CPV 셀을 부착하여도 집열 효율에 있어 열매체 온도가 상승하면 효율이 감소하고, 유량이 증가하면 효율 방정식의 기울기가 증가하여 효율의 변화가 커지는 특징은 집열시스템 단독으로 운영할 때와 동일하다.
- (3) CPV 셀은 표면 온도가 증가하면 전압은 감소하고, 일사량이 증가하면 전류가 증가한다. 그리고 효율은 전압과 전류의 곱으로 계산되어짐으로 열매체 온도와 일사량이 동시에 변하는 실외 실험으로는 효율의 변화를 파악하기 어렵다.
- (4) 복합시스템의 집열 효율과 CPV 셀의 발전 효율을 합하면 집열시스템 단독으로 운영하는 것보다 효율이 높으며, 이는 복합시스템의 집열은 주로 적외선 파장대역을 사용하고 CPV 셀은 주로 가시광선 파장대역을 사용함으로 사용하는 파장대역이 서로 달라서 가능한 결과이다.
- (5) 집열효율이 높은 유량에서 CPV 셀의 발전효율도 높게 나타났으며, 이는 집열효율이 좋으면 집광영역의 온도가 낮게 형성되기 때문에 CPV 셀의 발전효율도 높아지는 것이다.

다. CPV 모듈 성능분석에 대한 결론

태양광-열 복합시스템의 CPV 셀 발전효율과 비교하기 위해 히트싱크를 부착한 공랭식 방법으로 CPV 모듈을 제작하여 성능실험 수행하였으며, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) CPV 모듈의 효율에 영향을 미치는 변수로는 셀의 온도, 일사량, 집광비, 입사각, 집광률 등 많은 요소가 있지만 그중에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 요소는 2차 렌즈의 사용으로 셀 영역에 정확하게 집광시킬 수 있으면 2차 렌즈 사용 없이도 높은 효율의 시스템을 구축 할 수 있다.
- (2) 일사량이 증가하면 충전률은 감소하고 일사량이 감소하면 충전률은 증가하는데 이것은 일사량이 증가하면 집광영역의 온도가 상승하면서 충전률이 감소하는 것으로 보인다.

2. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

본 연구에서는 16개의 SOG 프레넬 렌즈 및 16개의 집광용 CPV셀로 1개의 모듈을 구성하였으며, 4개의 모듈을 통합하여 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 제작하였다. 따라서 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템의 총 64개 프레넬 렌즈는 각 CPV셀에 빛을 집광시키며, 집광된 빛은 CPV셀을 통하여 전기에너지로 전환된다. 또한 CPV셀 하부에 설치된 흡수기내에 열매체를 순환시킴으로써 CPV셀로 집광된 열에너지를 회수하게 된다. 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 집열 및 발전 성능실험 및 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가. 본 연구에서 제작된 다 모듈 태양광-열 복합시스템은 유량 6 l/min에서 최고 효율을 나타내었으며, 이는 7 l/min일 때 6 l/min보다 높은 에너지 흡수율을 나타내지만, 대류 열손실에 의한 외부로의 열 손실량이 크기 때문인 것으로 파악되며, 6 l/min일 때가 최고효율을 갖는 임계유량임을 알 수 있었다.
- 나. 유량과는 관계없이 열매체의 입구온도가 상승하게 되면, 주변 외기와의 온도차가 커지게 되며, 그에 따른 열손실이 증가하여 집열효율은 감소하였다.
- 다. 본 연구에 사용된 CPV셀은 온도가 증가하면 전압은 감소되고, 일사량이 증가하면 전류가 증가하는 일반적인 태양전지와 같은 특성을 보이고 있으며, 일사량이 증가함에 따라 CPV셀의 효율은 계속 상승해야하나 한계치가 존재하는 이유는 일사량 증가에 따른 전류의 증가폭보다 온도상승에 따른 전압의 감소폭이 더 크기 때문에 셀의 온도가 일정수준이상 올라가면 효율은 감소되는 특성을 보인다.
- 라. 복합시스템의 집열효율과 발전효율을 합하면 집열시스템 단독으로 운영하는 것보다 높은 효율이 나타나게 되는데, 이는 집광된 태양광이 CPV셀에 의해 발전이 이루어지고, 집광된 고온의 태양 복사열은 다시 회수되어 태양광 발전과 태양열 집열이 동시에 이루어지기 때문이다.
- 마. 집열효율이 높은 유량에서 CPV 셀 효율도 높게 나타나며, 이는 집열효율이 좋으면 집광영역의 온도가 낮게 형성되기 때문에 CPV 셀 효율도 높아지기 때문인 것으로 판단된다.

3. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 온실난방 실증

다 모듈 태양광-열 복합시스템을 통하여 생산된 전기는 축전지에 저장되며, 회수된 열은 축열조에 저장된다. 축전지에 저장된 전기는 복합시스템 운영에 필요한 펌프, 태양추적장치, 축열조의 보조열원 등에 공급되며, 축열조에 축열된 열은 축열매체를 통해 온실 내부에 설치된 라디에이터를 순환하며 온실 가온에 사용된다.

본 연구에서 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 이용한 온실난방 실증실험은 2015년 2월부터 4월의 기간 동안 8주간 수행되었으며, 유류대비 경제성 분석이 수행되었다. 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 난방 실험 및 경제성 분석 결과는 다음과 같다.

- 가. 실험 전 기간 동안 축열조 내의 축열매체 온도는 대체적으로 45 ~ 55℃로 잘 유지됨을 나타내었다.

- 나. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 이용한 온실난방 실험결과 야간의 기온이 낮아질 때 온실 내의 온도가 10 ~ 15℃로 잘 유지됨을 알 수 있었다.
- 다. 온실 내 야간의 상대습도는 실험기간 3월 21일부터 28일까지는 대체로 60% 이하의 낮은 값을 나타내었으나, 3월 19일부터 4월 20일까지의 실험기간 동안에는 야간의 상대습도가 대부분 80% 이상까지 상승하는 것으로 나타났다.
- 라. 온실 난방을 위해 다 모듈 복합시스템이 계통연계형으로 운용될 때 경제성은 매우 큰 것으로 나타났으며, 분리독립형은 계통연계형에 비하여 수익성이 낮게 나타났다.
- 마. 경제성 분석에 낮은 유류 가격이 이용되었으나, 유류 가격이 상승할 경우 온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성은 매우 커질 것으로 판단된다.

VI. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 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 농업시설 난방시스템으로의 활용성을 극대화 할 것임.
2. 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 기업체에 기술 이전함으로써 기술료징수가 가능케 할 것이며, 기업체의 독자적인 기술확보 및 기업체의 주 생산기종이 되도록 할 것임.
3. 본 연구개발을 통한 Pilot Plant 규모의 태양광-열 복합시스템을 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획임.
4. 다 모듈 태양광-열 복합시스템은 신기술인증 획득을 통해 국가지원 하에 보급을 극대화할 것임.

SUMMARY

Solar energy is unlimited clean resource without any environmental pollution. However, there are some disadvantages that it has low energy density and dependent on weather conditions. Therefore, the study for obtaining an economic value through efficiency improvement is necessary. Our country has very good advantages on using the solar energy because of receiving the sufficient sun energy due to the geographical position and seasonal weather conditions. The development of technology for the utilization of solar radiation as an alternative energy is very important for the use in agricultural industry as an agricultural energy source. Thus, the objective of this study was to develop the complex cogeneration system with CPV solar cell (CPV/T) for utilization of greenhouse heating. The results were obtained as follows:

1. Development for the complex cogeneration system with CPV solar cell (PV/T) of lab scale

In this study, experiments were conducted with four methods, and experimental results were compared and analyzed with investigating elements affecting on the efficiency. (1) The high concentrating solar collecting system was constructed with fresnel lens of SOG type. Analysis of efficiency characteristics were carried out through experiments with varying temperature and mass flow rate of heating medium. (2) The complex cogeneration system (CPV/T) which produces simultaneously heat and electricity were constructed with fixing CPV cell over the solar concentrating absorber. Efficiency of complex cogeneration system was analyzed, and the reasons that its efficiency is higher than that of solar collecting system were investigated. (3) The module of CPV solar cell with heat sink was constructed using fresnel lens of SOG type as solar concentrator, and its efficiency on producing electricity was compared with that of complex cogeneration system. (4) Heat transfer relationships between heating medium and absorbers of solar collecting system and complex cogeneration system (CPV/T) were investigated with CFD analysis, and their results were verified by comparing with experimental results.

- (1) Solar collecting system showed that the mass flow rate of 2ℓ/min had the highest efficiency. It was known that greater temperature of heating medium and temperature difference between ambient and heating medium had more heat loss with lowering the efficiency. Also, it was showed that increased mass flow rate induced the greater slop of efficiency equation, and insulation state of absorber and wind shield influenced on the efficiency.
- (2) Heat collecting efficiency of complex cogeneration system was similar with that of solar collecting system. Efficiency for electricity production was greatly influenced by CPV cell temperature. Sum of efficiency for heat collection and electricity production of complex cogeneration system was greater than single heat collection efficiency of solar collecting system.
- (3) Elements affecting on efficiency of CPV module are cell temperature, solar irradiation, concentration ratio, solar incident angle, etc. The most affecting element on efficiency is the use of the second lens. If solar concentration is made perfectly at the CPV cell region, the complex cogeneration system of high efficiency can be manufactured without using the second lens.
- (4) It was investigated that the most affecting elements on efficiency were thermal conductivity of insulation material and ambient air temperature around absorber through CFD analysis. Also, it was verified that summing efficiency for heat collection and electricity production of complex cogeneration system was greater than single heat collection efficiency of solar collecting system.

2. Development for the complex cogeneration system with CPV solar cell (CPV/T) of multi modules

In this study, multi-module cogeneration solar system with SOG Fresnel lens, CPV cell, solar tracker, and storage tank was constructed for the analysis of performance characteristics. The results of this study were summarized as follow;

- (1) The experiments were performed for flow rate of 3 ℓ /min to 7 ℓ /min during the daylight period from 10:00am – 5:00pm, and it was observed that thermal and electrical efficiencies for 6 ℓ /min were 61% and 25%, and also the aggregated collector efficiency was 86%. Thus, the flow rate value of 6 ℓ /min showed the highest efficiency as compared with other flow rates.
- (2) If the collector inlet temperature increases regardless with flow rate, the temperature difference between the surrounding air and heating medium will be increased, and thus the heat loss is increased and lead to decrease in collector efficiency.
- (3) The CPV cell used in this study shows electric power which is increased with the increasing rate of in solar radiation and decreased with increase in temperature of solar cell.
- (4) The efficiency of the CPV cell can be increased by the flow rate with high thermal efficiency, and if the thermal efficiency is significant, the temperature of solar collecting area will be lower, so the efficiency of the CPV cell will be increased.

3. Site experiment of the greenhouse heating with complex cogeneration system (CPV/T) of multi modules

Electricity and heat produced from complex cogeneration system (PV/T) are stored in the batteries and storage tank respectively. Electricity produced from complex cogeneration system (PV/T) is used in the operation of system such as pumps, solar tracker, and auxiliary heater in storage tank, etc. Heat stored in storage tank is used for heating of greenhouse through the circulation of heating medium inside heat exchangers. In this study, site experiments for greenhouse heating with using the complex cogeneration system (PV/T) were carried out a period of eight weeks from February to April of 2015. Also an economic analysis of the complex cogeneration system (PV/T) was conducted in comparison with utilization of oil in greenhouse heating. The results of this study were summarized as follow;

- (1) During the whole period of experiment, the temperature of heat storage medium in the thermal storage tank is generally kept between 45°C and 55°C.
- (2) The results showed that the air temperature inside greenhouse maintains well between 10 °C and 15°C during heating of night time, even though the outside air temperature is lowered such as below zero.
- (3) The relative humidity inside greenhouse presented generally to below 60% at night during the period of experiment from 21 to 28 March, but it was raised by 80% between 19 March and 20 April.
- (4) When grid-connected solar cogeneration system for greenhouse heating was operated, it appeared to be economically very good. In addition, the profitability of the stand-alone system is relatively low in comparison with grid-connected solar cogeneration system.
- (5) In this study, low oil price in recent had been considered for economic analysis. But if oil price is raised, it is noticed that the economic feasibility of solar cogeneration system for greenhouse heating proves to be a better option.

CONTENTS

Chapter 1 Concepts of research project -----	16
Section 1 Objectives and necessity of research -----	16
Section 2 Scope of research -----	27
Section 3 Achievement for research purpose of results -----	28
 Chapter 2 Present status of research in Korea and foreign countries -----	29
Section 1 Research status in Korea -----	29
Section 2 Research status in foreign countries -----	30
Section 3 Position of study results on the status of research in Korea and foreign countries -----	32
 Chapter 3 Contents and results of research -----	33
Section 1 Development of cogeneration (CPV/T) system of lab scale -----	33
Section 2 Development of multi module cogeneration (CPV/T) system -----	93
Section 3 Site experiment of greenhouse heating with multi module cogeneration (CPV/T) -----	129
 Chapter 4 Achievement and contribution -----	162
Section 1 Achievement of research purpose -----	162
Section 2 Contribution to related fields -----	164
 Chapter 5 Plane for the practical use of research results -----	165
Section 1 Plane for the practical use and industrialization -----	165
Section 2 Supply of technical and political references -----	166
 Chapter 6 Compilation of scientific information from foreign countries -----	170
Section 1 Solar concentrating technology -----	170
Section 2 Technology of multi conjunction solar cell -----	175
 Chapter 7 Present status of research facilities and equipments -----	182
 Chapter 8 Records of safety management of lab -----	183
Section 1 Safety checking -----	183
Section 2 Study and training for safety -----	183
 Chapter 9 References -----	184

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표 -----	16
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 -----	16
제 2 절 연구개발의 범위 -----	27
제 3 절 연구성과 목표 대비 실적 -----	28
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	29
제 1 절 국내 기술개발 현황 -----	29
제 2 절 국외 기술개발 현황 -----	30
제 3 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 -----	32
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 -----	33
제 1 절 소형 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발 -----	33
제 2 절 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발 -----	93
제 3 절 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 온실난방 실증 -----	129
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 -----	162
제 1 절 연구개발목표의 달성도 -----	162
제 2 절 관련분야에의 기여도 -----	164
제 5 장 연구개발 성과 및 활용계획 -----	165
제 1 절 실용화 및 산업화 계획 -----	165
제 2 절 기술자료 및 정책자료 제공 -----	166
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보 -----	170
제 1 절 태양 집광기술 -----	170
제 2 절 다중접합 태양전지 기술 -----	175
제 7 장 연구시설·장비 현황 -----	182
제 8 장 연구실 안전관리 이행실적 -----	183
제 1 절 안전점검 -----	183
제 2 절 교육 및 훈련 -----	183
제 9 장 참고문헌 -----	184

제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구개발의 목표는 집광효율을 극대화한 프레넬 태양광 집광기 요소기술을 개발하고, 집광기의 흡수기 표면에 집광형 태양전지(CPV)를 설비한 태양열 및 전기 동시 생산이 가능한 고효율의 프레넬 태양광 집광시스템을 설계·제작하여 성능검증 후 농업시설 난방을 위한 실증실험을 통해 개발된 CPV 장착형 프레넬 태양광 집광시스템을 농산업 분야에 실용화하고자 하는데 있다.

2. 연구개발의 필요성

현재, 우리나라의 농업은 에너지 집약형 산업으로 변하고 있다. 그 동안 농업의 생력화를 위해 농업생산 시설의 자동화 시책을 추진해 오면서 온실, 축사, 버섯 재배사, 건조 저장실 등을 중심으로 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하여 농산물 생산비에서 에너지가 차지하는 비중이 매우 높아졌다. 또한 소비자의 선호도 변화에 따라 농업생산도 계절을 초월한 연중공급체제로 전환되고 있으며, 따라서 소비자가 겨울철에도 신선농산물 소비를 원하고 있어 농가는 소비자의 선호에 맞춰 농산물을 생산하기 때문에 유류 사용량은 더욱 증가하고 있다.

그러나 이러한 농업생산성을 지탱하던 축의 일부였던 화석에너지의 지속적인 고갈과 날로 치솟는 에너지비용으로 농업의 경쟁력은 악화되고 있고, 다른 산업과 마찬가지로 신재생에너지의 도입을 서두르지 않을 수 없는 상황에 처해있다. 우리나라의 작물재배는 1970년대까지 대부분이 노지재배에 집중되어 에너지비용이 크게 문제되지는 않았으나, 1980년대 중반부터 온실의 설치면적이 크게 증가하면서 겨울철 난방에너지의 소비가 급증하게 되었다. 특히 채소, 과채류, 화훼류 등의 소비패턴이 계절소비에서 연중소비로 변환되면서 온실면적은 1990년 약 1,500ha에서 2007년 53,036ha로 증가되어 농업용으로 공급되는 석유에너지의 60%이상이 온실의 난방에 소비되고 있으나 유류가격 상승으로 인해 농업 에너지난을 가중시키고 있다. 그러나 에너지원이 한정되어 있는 우리나라의 현실로 볼 때 에너지원의 확보를 위한 대책이 명확하게 수립되어 있지 못한 실정에서 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 더욱이 자본구조가 취약한 농업부문에서는 에너지 가격의 상승이 농업생산비를 증가시키고 있어 농업시설물의 유지 및 운영에 위기를 맞이하고 있다. 우리나라의 에너지자원 확보는 지속적으로 대두될 문제라는데 심각성이 크며, 이 때문에 관계 정부당국에서는 면세유 확대공급, 대체에너지

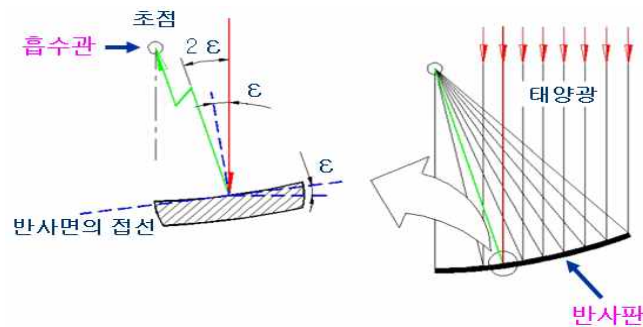
지원 개발, 에너지 절약형 설비 시스템 구축 등 다각적인 노력을 강구하고 있다. 그러나 이러한 노력은 단기적이어서는 안 되며, 장기적이고, 항구적인 농업에너지 수급대책이어야 한다. 이를 위해서는 근본적으로 대체에너지 개발, 에너지원의 다양화, 부존자원 이용의 극대화가 이루어지지 않으면 안 된다. 우리나라의 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가추세로 국내 소비 에너지 사용량의 97% 이상이 수입에 의존하고 있는 실정이다. 지구 환경문제와 관련하여 지구 온난화의 원인 중 화석연료(화석에너지의 단위 열량당 CO₂ 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 CO₂ 55%, CFC-11 17%, CFC-12 7%, CH₄ 15%, N₂O 6%)이 가장 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제들의 해결의 일환으로 각국에서는 에너지 절약 기술과 아울러 대체에너지의 개발에 중단 없는 노력을 경주하고 있다. 또한 현대의 주된 에너지원인 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료 매장량에 대한 한계성을 생각해 볼 때 가까운 장래에 닥칠 심각한 에너지난으로 인한 과국을 벗어나기 위하여 폐자원의 에너지이용 및 대체에너지에 대한 연구 개발이 촉진되고 있고 있다.

특히 농가에서 이용하는 에너지는 석유류 의존 비중이 매우 높으며, 과채류는 가온을 위해 석유류 사용이 95%이고 전기에 의존하는 비중은 5% 내외로 매우 낮아 농업용 대체에너지 개발 및 보급연구가 시급한 실정이다. 원예시설 난방비를 줄이기 위해서는 석유사용 난방장치 이용을 최소화하고 난방에너지를 적게 들여 작물을 재배할 수 있는 에너지 절감기술의 적극적인 활용이 필요하다. 이와 함께 에너지 절약형 시설구조와 자재를 사용하고 난방용 기계장치를 효율적으로 이용하면서 석유를 대체 할 수 있는 신 재생에너지 이용에 많은 관심과 적극적인 도입 등이 종합적으로 이루어질 때 고유가를 극복해 낼 수 있을 것이다.

우리나라는 지리적인 위치와 계절적 기후조건이 연중 태양에너지를 충분히 공급받을 수 있으며 특히 동절기에는 날씨가 건조하고 맑아 태양복사량이 많은 편이어서 태양에너지 이용에 매우 유리하다. 그러므로 대체에너지로서 태양에너지 이용분야의 실용기술을 개발하여 농산업 분야의 에너지원으로의 확대 및 보급이 절실한 실정이다. 따라서 국내외에서 개발이 시도된 적이 없는 프레넬렌즈를 태양광 집광기로 사용하여 고 집광 태양전지(CPV)로 전기를 생산함과 동시에 고온의 열을 효율적으로 생산하는 장치를 개발하여 농업시설 난방 뿐 아니라 건조장치의 열원 및 농가주택 난방 등 다양한 농업 현장 적용분야의 설비에 이용할 수 있을 것이다. 본 연구의 필요성을 기술적인 측면, 경제·산업적인 측면, 사회·문화적 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

가. 기술적 측면

- 국내의 농업 현장에서 태양에너지 이용에 대한 실용적인 기술개발이 과거부터 여전히 요구되어 왔으나, 아직까지도 뚜렷하고 획기적인 기술이 개발되지 못하고 있어 대체에너지 기술개발이 시급한 실정임.
- 태양광 집광시스템을 이용한 전기 및 열에너지 생산은 기름보일러보다 기술적으로 환경에 미치는 영향이 없는 무공해 에너지로 석유에너지 대체용으로 활용함으로 환경문제를 해결하며, 동시에 대체에너지 산업을 활성화시킬 수 있다는 점에서 개발과 동시에 실용 가능성이 매우 큰 산업적인 기술임.
- 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 없어 자원빈국인 우리나라에서 획기적으로 에너지 생산량을 늘릴 수 있는 신재생 에너지원임.
- 태양은 봄, 여름, 가을, 겨울의 주어진 고도와 방위각에 따라 태양의 궤도를 따라 일정하게 움직이고 있으며, 이러한 태양에너지를 산업 에너지원으로 이용하는데 사용료가 전혀 요구되지 않음.
- 현재 국외에서 실용화 되고 있는 단지 태양열 생산을 위한 집광기는 표면적에 일사를 모으기 위한 접시형태나 원통형의 반사판을 갖는 집열기로 초점에 위치한 흡수기는 태양열을 흡수하며 이곳을 통과하는 열매체는 흡수기의 열을 빼앗아 열에너지를 이용하는 장치로, 비교적 고온을 요하는 곳에 사용함 [그림 1-1].



[그림 1-1] 집광의 기본 원리

- [그림 1-2]와 같이 국외에서 이용되고 있는 중·고온 열 이용을 위한 태양열 집열기 기술 분야에서 고효율화는 집광형에서와 같이 반사경을 부착하여 태양복사광을 선(line-focus), 혹은 점(point-focus)에 모으는 방법이 있으나, 본 연구에서 개발하여 농업 시설 에너지원으로 이용하고자 하는 장치는 국내외에서 전혀 개발된바 없는 프레넬렌즈

를 이용하여 효율적으로 태양광을 집광하고 흡수기에 장착된 집광형 태양전지(CPV)에 의해 전기 및 열을 동시에 생산하는 장치로 에너지 변환 효율이 매우 높고 또한 경제성이 큰 태양광 집광시스템임.



(a) 포물형 원통 집광기(PTC)

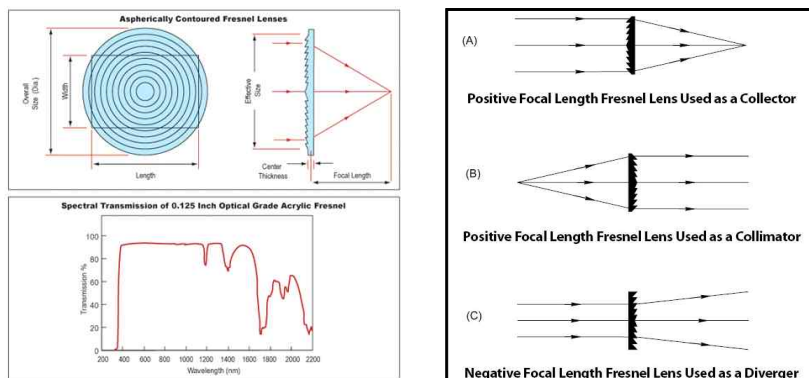


(b) 포물형 접시 집광기

[그림 1-2] 집광형 태양열집열기

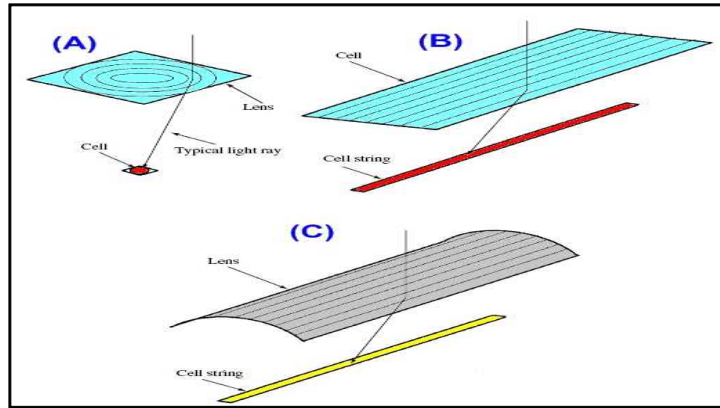
○ 특히 에너지 밀도가 낮은 태양열을 이용해서 중·고온으로 축열하기 위해서는 현재 이용되고 있는 접시형이나 PTC형과 같은 집광형 집열기에 태양을 추적하도록 구성된 제품들이 사용되나, 이런 집광형집열기를 이용 할 때 태양광을 초점에 정확히 모이게 제작하는 기술적 문제뿐만 아니라 대기에 노출된 반사판의 오염에 의해 태양광 반사율이 저하되어 태양열 집열효율이 저하되는 문제점이 발생되고 있음.

○ 프레넬렌즈는 프랑스의 물리학자인 어그스트 프레넬(Augustine Fresnel)에 의해서 발명되어 졌으며, 얇고 평면의 광학 렌즈인데 작고 좁은 원형의 돌기들로 이루어진 것으로 기존의 유리로 된 볼록렌즈 등에 비해 무게와 두께 그리고 가격 등을 개선한 플라스틱 판형태의 렌즈로 가공이 가능하며, 각각의 돌기들은 일정한 비율에 의해 조금씩 다른 각도로 [그림 1-3]과 같이 빛을 한 개의 초점으로 모아 줄 수 있도록 설계 할 수 있는데, 각각의 돌기들은 모두가 빛을 굴절시키는 프리즘 형태의 개별 렌즈들이라 할 수 있고, 태양광 투과율이 90%이상으로 태양광을 한 점으로 집광하기에 매우 효과적임.



[그림 1-3] 프레넬렌즈의 태양광 집광원리 및 구조

○ 프레넬렌즈는 점으로 집광하는 것이 일반적이지만[그림 1-4-A], 렌즈의 가공 방법에 따라서는 [그림 1-4-B, C]와 같이 선으로 집광하는 것이 가능함.



[그림 1-4] 프레넬렌즈의 집광 형태: A-점집광, B, C-선집광

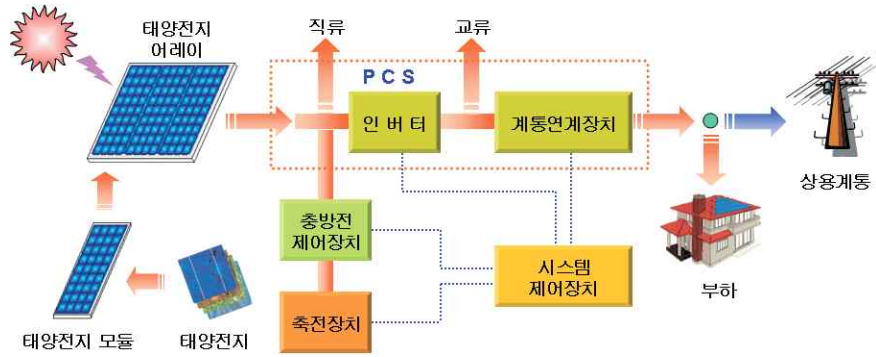
○ 또한 프레넬렌즈는 구면수차를 줄일 수 있어 상이 흐트러지는 것을 막을 수 있는 특별한 광학렌즈로 PMMA, PVC, PC(폴리카보네이트)와 같은 재질로 제작할 수 있어 두껍고 무거우며 제작비용이 많이 요구되는 유리재질의 프레넬렌즈를 대체할 수 있어 저비용으로 태양광 집광용으로 이용하기에 매우 유용함.

○ 본 연구에서는 태양광 집광효율을 저하시키는 요인을 제거하기 위해 i) 프레넬렌즈를 반사판 대신 이용함으로 반사판의 오염 및 스크래치 발생에 따른 반사율이 저하되는 문제점이 발생되지 않으며 태양 복사광을 정확히 초점에 집광할 수 있고 ii) 먼지나 눈비에 의한 프레넬렌즈 오염시 청소가 매우 용이하며, iii) 같은 집광면적 기준으로 반사판에 비해 작은 크기의 프레넬렌즈가 소요되고 집광비가 높으며, 구조가 간단하고 설치 면적이 작아도 되고, iv) 프레넬렌즈는 PMMA, PVC, PC(폴리카보네이트)와 같은 플라스틱 재질로 제작할 수 있어 경량이고 파손의 우려가 적으며 제작비용이 매우 저렴한 장점이 있음.

○ 태양광발전은 반도체가 갖는 광전효과 photovoltaic effect를 이용하여 반도체 혹은 염료 고분자 등의 물질로 이루어진 태양전지(PV: Photovoltaics 또는 Solar cell)를 이용하여 태양의 빛에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술로 photo는 빛을, volt는 전기연구의 개척자인 Alessandro Volta의 이름에서 유래하였음.

○ 태양전지를 일반적으로 소재에 따라 분류를 하여 실리콘 태양전지, 화합물 반도체 태양전지, 염료감응 태양전지, 유기분자접합 태양전지 등으로 분류됨.

○ 태양광 발전 시스템은 무한정 무공해의 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 발전방식으로 빛을 받아서 전기로 전환시켜 주는 부분(태양전지 모듈)과 생산된 전기를 수요에 맞도록 교류로 변환시키고 계통에 연결시켜 주거나 저장하는 부분(PCS, 축전장치 등, BOS)으로 구성됨[그림 1-5].

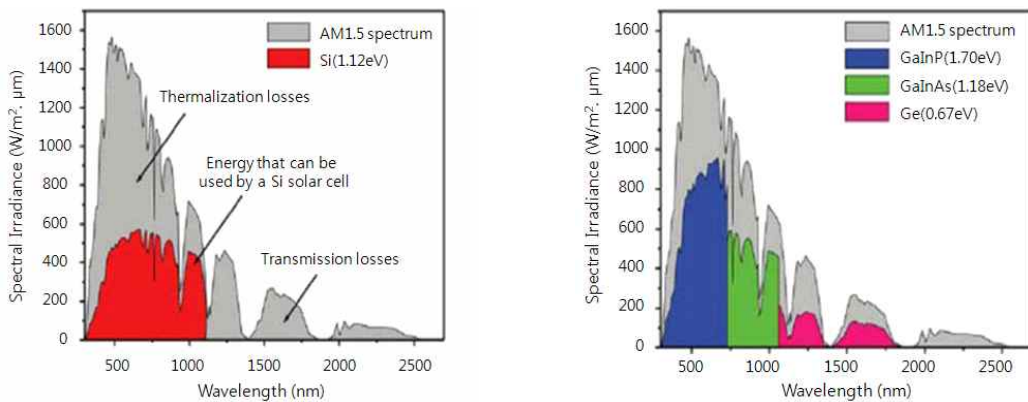


[그림 1-5] 태양광발전 시스템 개략도

○ 최근 태양전지 기술의 진보추이는 발전효율이 10 ~ 20% 범위인 결정형 실리콘 태양전지(PV)에서 2세대 박막형전지로 진보하는 동시에, 발전효율이 30 ~ 45% 범위로 획기적으로 높은 이른바 다중접합형(multi-junction) 집광형 태양전지(CPV: Concentrating Photovoltaic Cell)가 개발되면서 관련 기술혁신이 가속되고 있으나, 아직 CPV의 이용 및 보급 기술은 미개척 분야임.

○ 실리콘 태양전지(PV)는 빛에너지를 전지에너지로 변환 가능한 p형과 n형 반도체 물질을 접합한 단일 접합(single junction) 구조이며, 빛을 흡수할 수 있는 흡수 대역이 좁아 광 변환효율이 낮음[그림 1-6 (a)].

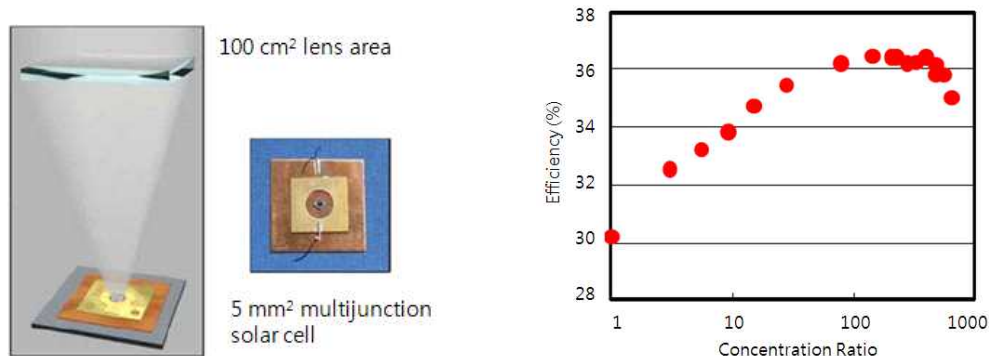
○ 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지인 집광형 태양전지(CPV: Concentrating Photovoltaic Cell)는 광 흡수 대역이 서로 다른 단일 접합 태양전지를 적층함으로써 광 흡수 대역이 다양한 밴드갭 에너지를 가지는 박막 제조가 용이하고, 직접천이(direct bandgap) 구조를 가지고 있어 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 매우 높음[그림 1-6 (b)].



(a) 1세대 태양전지(단일접합 Si 태양전지: PV) (b) 2세대 태양전지(다중접합 태양전지: CPV)

[그림 1-6] 태양전지 구조에 따른 광 흡수 대역

○ 집광형 태양전지(CPV)는 [그림 1-7 (a)]과 같이 태양광을 렌즈나 거울 또는 태양광 집광기 등을 이용하여 넓은 면적의 태양광을 작은 면적의 태양전지에 빛을 모으는 방법을 사용하며, 집광률이 200배까지 집광률 증가에 따라 효율이 증가하고 500배 이후에는 고 집광으로 인해 많은 전류가 발생하여 전극에 저항이 발생하여 효율이 다소 감소나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 1000배 집광시 효율이 1% 감소하므로 고집광형 태양광 발전시스템에 적합함[그림 1-7 (b)].



(a) 집광형 태양전지(CPV) (b) III-V 화합물 반도체 태양전지의 집광비율에 따른 효율변화
 [그림 1-7] 집광형 태양전지(CPV) 구조 및 집광비율에 따른 효율변화

○ 따라서 태양광 집광기술과 함께 CPV를 적용할 수 있는 독창적 기술을 확보하고, 시스템을 개발하여 시장을 선점하거나 개척할 필요성이 큼.

나. 경제·산업적 측면

○ 농업부분의 에너지원별 소비량은 석유가 73%로 가장 높은 가운데, 전기 19%, 석탄 8%, 천연가스 0.3% 등의 순으로 타 산업에 비해 농업부문은 전량 수입에 의존하는 유류소비가 주를 이루고 있음.

○ 우리나라의 시설원예 면적은 1995년 43,131ha에서 2007년에는 53,036 ha로 크게 증가하였으며[표 1-1], 그 중 가온재배 면적은 12,962 ha로 시설면적의 24.4%를 차지하고[1-2], 유류사용(대부분 경유, 중유등이 사용) 시설이 93%로 농가의 농업경영비(50% 이상) 부담이 급격히 상승하고 있어, 농가 실정에 맞는 저 비용의 대체에너지 이용 기술개발 및 보급이 시급한 실정임.

[표 1-1] 2007년도 기준 시도별 원예시설 면적

시도	계(ha)	채소			화훼		
		소계	비닐하우스	철골온실	소계	비닐하우스	철골온실
전국	53,036	49,828	49,499	329	3,208	2,888	320
서울	393	327	327	0	65.9	65.4	0.4
부산	1,097	865	865	0	232.4	99.4	133.0
대구	977	947	946	1	30.1	30.0	0.1
인천	347	310	309	1	36.7	35.2	1.5
광주	1,086	1,046	1,044	2	39.5	38.6	1.0
대전	193	173	173	0	19.5	15.2	4.4
울산	299	281	279	2	17.8	16.0	1.8
경기	7,219	6,048	5,992	56	1,171.4	1,117.4	54
강원	2,236	2,114	2,089	25	122.3	118.0	4.4
충북	2,018	1,933	1,922	11	84.6	76.4	8.1
충남	7,838	7,575	7,535	40	263.3	241.9	21.4
전북	4,027	3,851	3,821	30	176.0	148.4	27.6
전남	4,840	4,633	4,585	47	206.8	197.9	8.9
경북	9,909	9,814	9,794	20	94.9	70.4	24.4
경남	10,281	9,784	9,707	77	497.4	482.2	15.3
제주	276	127	110	17	149.4	135.6	13.8

* (주) 철골온실 : 유리온실, 경질판(PC,PET) 온실(2008, 농촌진흥청)

[표 1-2] 시설원예 면적 및 난방면적(2008, 농업진흥청)

년도	시설면적(ha)			난방면적(ha)			난방비율 (B/A,%)
	계(A)	채소	화훼	계(B)	채소	화훼	
'00	52,189	48,853	3,336	12,398	10,952	1,446	23.8
'07	53,036	49,828	3,208	12,962	10,396	2,566	24.4

* (주) 1. 채소생산실적 및 화훼재배현황(2007, 농식품부)에서 발췌하여 재구성

2. 화훼 난방면적 : 화훼 시설면적의 80% 적용

○ 2008년 기준 농어업용 면세유 사용량은 2,970천kl으로 국가전체 유류사용량의 2.6% 수준으로 이 중 농업용은 1,975천kl이고, 농업용은 시설난방에 64%의 큰 비중을 차지하고, 농기계에 35%를 사용하고 있음<표 1-3>.

[표 1-3] 농업용 에너지 소비량(2008년)

사용처	사용량(천kl)	용도별 비율
시설난방	1,256	63.6
농기계	685	34.7
기타	34	1.7
계	1,975	100.0

* 자료: 농협중앙회 면세유 자료를 재구성하였음.

○ 정부는 화석연료 비중을 줄이고 기후변화에 효과적으로 대응하기 위해 신재생에너지 비중을 확대 할 계획<표 1-4>에 있으며 태양에너지는 환경 및 경제문제에 대처할 수 있는 가장 현실적인 농업용 신재생에너지임.

[표 1-4] 국가적 신재생에너지 보급 계획

연도	폐기물	수력	바이오	풍력	태양광	태양열	지열	해양
2008	73.7	14.9	8.1	1.7	0.9	0.5	0.1	-
2030	33.4	4.4	31.4	12.6	4.1	5.7	3.8	4.7

* 신재생에너지 보급 목표: (2008) 2.6% → (2012) 3.5% → (2020) 6.1% → (2030) 11%

○ 신·재생에너지원별 공급 잠재량을 보면 지열 30.8%, 수력 23.04%, 태양열 23.08%, 태양광 10.34%로 순으로 태양광 및 태양열을 합한 태양에너지 공급 잠재량은 33.42%로 가장 크다고 할 수 있음<표 1-5>.

[표 1-5] 신·재생에너지 보급 잠재량

단위: 천TOE

구분	부존잠재량	가용잠재량	기술잠재량	공급잠재량	비율(%)
태양열	11,159,495	3,483,910	104,517	20,903	23.08
태양광			46,825	9,365	10.34
풍력	246,750	12,003	9,416	810	0.89
	220,206	38,150	20,007	1,727	1.91
바이오	141,855	11,656	6,171	6,171	6.81
지열	2,352,800,000	131,050,690	191,334	27,896	30.80
해양				2,839	3.14
수력	126,273	65,210	20,867	20,867	23.04
합계	2,364,694,579	134,661,889	399,137	90,578	100.01

* 자료: 지식경제부, 제3차 신·재생에너지기본계획, 2008.12

○ 우리나라의 평균일사량(수평면 전일사량)은 1 m² 당 하루 약 3천 1백 킬로칼로리로서 우리나라의 태양에너지 이용 기술개발의 성공 잠재적 여건을 제시하고 있음.

○ 한편, 일사량 성분 중 직달일사량은 최근에 고온에너지를 얻도록 설계되는 고온 집광시스템, 즉 태양광 집광기와 같은 기기의 개발과 보급을 위해서 절대적으로 요구됨.

○ 우리나라는 청명한 날 1 m² 당 하루 4천 6백 킬로칼로리의 직달 일사 에너지를 받고 있는 것으로 나타났고, 연평균 1일 전일사량은 3,065kcal/m²으로 나타나 태양에너지 부존량은 100억 TOE에 해당되며<그림 1-9>, 이로써 우리나라에서도 고효율 태양광 집광시스템의 활용이 가능하다는 점이 입증되어 일사량의 50% 이상을 열 및 전기로 변환시킬 수 있는 고 집광기술의 활성화가 기대됨.

○ 현재 태양열 이용시스템과 태양광 발전시스템은 서로 독립적으로 열 또는 전기 생산을 위한 단일 목적으로 이용되고 있으나, 집광형 태양전지(CPV)가 장착된 프레넬 태양광 집광시스템 개발은 4계절 고온의 열과 전기를 동시에 생산할 수 있어 경제성이 매우 큼.

다. 사회·문화적 측면

○ 지구 온난화와 대기오염, 수질오염, 토양 산성화 등과 관련된 세계적인 환경문제와 우리의 환경을 깨끗이 보전할 수 있는 에너지원의 사용에 대한 사회적 인식이 증가하고 있으며, ‘환경문제는 농업인 스스로 해결해야 한다.’라고 외쳐 온 것이 어제 오늘의 일이 아님.

○ 중국, 인도, 러시아, 브라질 등 신흥 개도국이 주도한 에너지자원의 수요 증가로 화석 에너지의 사용량은 매년 급증하고 있으며 수요 증가와 더불어 화석 에너지를 미리 확보하기 위한 선진국 및 신흥 개도국들의 움직임으로 인해 화석에너지 가격의 지속적인 변동이 예상된다.

○ 지구 온난화의 주범으로 알려진 온실가스 배출량 감축방안 모색 및 국가별 이산화탄소 방출쿼터를 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 새로운 대체에너지 시스템의 실용화를 위한 기술 개발이 절실한 실정임.

○ 국내 수요에너지의 98%를 수입에 의존함에 따라 수입대체 효과가 크다고 할 수 있는 대체에너지의 실용화를 통하여 현 국내 상황에서 강력히 요구되는 국가 경쟁력제고의 한 방법으로 고온의 열과 전기를 동시에 생산할 수 있는 고효율의 CPV 태양광 집광시스템 개발은 절대적으로 필요한 연구임.

○ 국제적인 기술보호 장벽을 고려할 때 유가상승과 국제적 환경규제가 본격화되면 21세기 전반에 예상되는 급격한 에너지 환경변화에 자체 기술력을 갖고 대응할 수 있느냐 하는 것은 국가적으로 매우 중요한 변수가 될 것임으로 국가차원의 적극적인 기술개발 및 보급시책이 매우 필요한 실정임.

○ 따라서 이를 대체에너지 이용 기술개발 측면에서 지원하기 위해서는 열 및 전기 동시 생산용 CPV 태양광 집광시스템을 이용한 농업시설 난방 기술개발과 같은 범 산업적으로 이용할 수 있는 기술을 적극 개발하여 실용화시켜야 함.

○ 앞으로 예상되는 에너지 시스템 환경변화를 객관적으로 인지하고 태양에너지와 같은 대체에너지가 차세대의 에너지공급을 담당 할 수 있어야만 에너지 문제로 재정적 곤경을 겪고 있는 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 대체에너지 이용기술개발에 우리의 노력을 하나로 모아야 할 것임.

제 2 절 연구개발의 범위

1. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

- 가. 집광형 프레넬렌즈 집광기 설계 및 제작
- 나. 열 회수를 위한 집광기의 흡수기 개발
- 다. 흡수기 열손실 최소화 기술개발
- 라. 흡수기 표면에 CPV 셀 부착 기술개발
- 마. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 설계·제작
- 바. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 성능시험 설비구축
- 사. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집열 및 발전효율 분석
- 아. CPV 장착 단일 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 최대 발전 및 집열효율 분석

2. 실증 실험용 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발 및 성능분석

- 가. 실증 실험용 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 설계 및 설비 구축
- 나. 태양추적 제어장치 구성 및 설비
- 다. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 구동축 및 태양 추적장치 설비
- 라. 복사열 축열을 위한 축열방법 및 축열조 제작
- 마. 외기 조건에 따른 축열조 축열성능 분석
- 바. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 성능시험 설비구축
- 사. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집열 및 발전효율 분석
- 아. 다 모듈 CPV 장착 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 집광시스템의 최대 효율 작동조건 분석

3. 난방 실증실험 설비구축 및 시스템 효율 평가와 경제성 분석

- 가. 실증실험용 비닐하우스 설계 및 설비
- 나. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템, 축열조 및 온실의 유로 설계·설비
- 다. 온실 내 난방용 열교환기 설비 구축
- 라. 태양광 발전 전기 이용을 위한 독립형 시스템 구축
- 마. 태양광 발전 자체 생산 전력을 이용한 태양광-열 복합시스템 구동 설비 구축
- 바. 비닐하우스 내 온습도 모니터링 시스템 구축
- 사. 비닐하우스 내 온습도 환경 조사
- 아. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 이용 온실의 난방효율 분석
- 자. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 이용 온실의 에너지 경제성 분석

제 3 절 연구성과 목표 대비 실적

구분 (연도)	세부연구목표	연구실적	달성도 (%)
1차년도 (2012)	● 프레넬 태양광 집광기 제작	▶ 프레넬 태양광 집광기 설계/제작	100
	● 열 회수를 위한 집광기 흡수기 개발	▶ 열 회수를 위한 흡수기 설계/제작	
	● 단일 CPV 장착 태양광-열 복합 시스템 개발	▶ 단일 CPV 장착 태양광-열 복합시스템 설계/제작	
	● CPV 장착 단일 프레넬 태양광-열 복합 시스템 성능 분석	▶ CPV 장착 단일 태양광-열 복합시스템 발전 및 집열 효율분석	
2차년도 (2013)	● 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 설비	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 설계/제작	100
	● 태양 추적장치 설비	▶ 센서식 2축 태양추적장치 설비	
	● 태양열 축열조 설비	▶ 태양열 축열을 위한 축열조 설비	
	● 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 성능분석	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템의 집열 및 발전 효율 분석	
3차년도 (2014)	● 온실난방 설비	▶ 온실 설계/제작 및 난방 설비	100
	● 태양광 발전 독립형 시스템 설비	▶ 온실난방용 태양광 발전 독립형 시스템 설비	
	● 온실 내 온습도 모니터링 시스템 구축	▶ 온실 내 온습도 센서 및 모니터링 시스템 설비	
	● 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실의 난방 효율 분석	▶ 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실의 난방성능 분석	
최종 평가	● 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 개발	▶ 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 설비	100
	● 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실 성능분석	▶ 다 모듈 태양광-열 복합시스템 난방효율 실험 및 분석	
	● 에너지 경제성 분석	▶ 유류비용 대비 경제성 분석	

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

- 우리나라는 1980년대의 두 차례의 에너지 파동을 거치면서 지난 20여년동안 태양에너지의 활용에 상당한 관심을 가지고 관련 기술의 개발 및 이의 보급에 정부가 주도적인 역할을 수행해 왔음.
- 열매체를 이용한 상변화식 평판형 집열기를 사용한 가정용 온수 시스템이 98%를 차지하고 있고 약 12개의 업체가 생산 보급하는 상태이며, 현 국내 대용량 설비로서 비닐하우스 난방, 지중난방 또는 양어장에 응용하여 설치한 사례가 있으나 모두 실패한 것으로 밝혀짐.
- 이와 같은 온수기는 저온용으로서 난방을 위한 열원으로 사용할 때 기술적, 경제적으로 문제점을 가지고 있음이 드러났으며, 또한 진공관형 태양열집열기를 사용한 시스템의 경우 외국에서 전량 수입하여 시공하는 대리점 수준의 업체가 있으나 상당히 고가인 것이 단점임.
- 현재 정부지원 하에 실용화된 새로운 기술의 고효율 태양열시스템은 전무한 상태로 선진국의 개발동향과 국내의 일사조건에 비추어 보았을 때 열 및 전기 동시생산 CPV 집광기를 개발하여 이를 원예시설 난방과 같은 농업시설 에너지원으로 이용하는 것이 효율적임.
- 최근 (주)선다코리아와 (주)지엔씨테크놀러지가 산업공정열 이용을 위해 545.37 m²의 유효 집광면적을 갖는 반사판을 이용한 PTC 태양열 집광형 집열기를 설치하여 실증시험 중에 있음.
- 본 연구에서 수행하고자 하는 새로운 기술인 고효율의 프레넬 태양광 집광시스템은 전무한 상태로 선진국의 개발동향과 국내의 일사조건에 비추어 보았을 때 한국형의 프레넬 태양광 집광기를 개발하고 CPV와 통합된 시스템을 구축하여, 생산된 고온의 열 및 전기를 농산업 분야에 이용하는 것은 매우 효율적일 것임.
- 실리콘을 이용하는 태양전지 기술은 산업자원부가 주관하는 대체에너지 기술개발사업에 치중하고 있고, 2012년까지 단계적인 발전계획에 의거, 효율도 12%에서 18%로 상향 조정하는 등 태양광 산업 강국으로의 도약을 준비 중에 있으나, 국내에서는 개발된 기술이 상업화되어 실증연구가 이루어지는 수준으로 기술수준은 선진국 대비 71%, 모듈가격은 80% 수준임.
- (주)KPE(30MW), 현대중공업(30MW), (주)신성홀딩스(50MW), (주)미리넷솔라(30MW)가 결정질실리콘 태양전지 생산에 주력하고 있고, 실리콘 박막태양전지 개발은 국내에서는 한국철강이 최초로 인증을 획득 양산화(30MW) 및 R&D를 적극 추진 중임.

- 폴리실리콘분야는 2008년 3월부터 동양제철화학이 상업 생산을 시작한 이래 KCC도 생산에 성공하였으며, 웅진폴리실리콘, LG화학, 한화석유화학, 삼성석유화학 등 국내 대표 화학회사들은 2010년 이후 폴리실리콘 생산계획을 발표하였음.
- 비실리콘계 태양전지 개발을 위해 국내에서 CIGS 박막 염료감응 유기태양전지에 기술투자 중이나 국내 CIGS 박막셀 기술은 세계수준의 94% 수준임.
- 그러나 국내에서 다중접합 태양전지인 집광형 태양전지(CPV) 개발을 위한 연구는 일부 정부출연연 구소를 중심으로 진행되고 있으나, 아직 가시적 성과가 보고되고 있지 않으며, 반도체 제조 기술을 축적한 대기업의 기술투자가 이루어지면 그 개발이 가속될 가능성이 있음.
- CPV 자체 기술개발 못지않게 CPV를 제품에 이용하여 상업화하는 기술도 중요하지만 이에 관한 기술 확보도 국내에서는 아직 초보 수준임.
- 2012년까지 단계적인 발전계획에 의거, 국내의 태양광 발전 설비를 1,300MW까지 보급할 계획이고 전 세계 태양광 설치용량에서 국내 태양광 시장 비중이 점차 커지고 있으며, 2007년 기준으로 주요국 이외 국가 전체 229MW 중 50MW를 차지함으로써 약 21.8 %를 차지하였고 지속적으로 상승하고 있는 추세임.
- 그러나 현재까지 국내에서 태양열 및 태양광 발전 설비가 농산업 분야에 적용된 사례는 매우 드문 실정임.

제 2 절 국외 기술개발 현황

- 기후변화 협약 후 선진국들의 경우 CO₂ 배출을 줄이기 위해 대체에너지 연구개발에 대한 정부의 지원을 증가시키는 추세에 있으며 이에 따라 여러 대체 에너지자원 중에서 높은 점유율을 차지하는 태양에너지 이용이 현격히 증가할 것으로 예상된다.
- 태양열 이용기술 개발은 저온분야의 경우 첨단소재 개발을 통한 고효율, 저가화에 집중하고 있으며, 최근 중고온분야의 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 사용지역을 살펴보면 높은 일사량을 갖는 캘리포니아, 플로리다에 집중되어 있으며 지역적 특성 및 미국인의 생활문화에 따라 저온용 집열기를 사용하여 Pool Heating, Hot Water 및 Space Heating에 많이 적용되어 왔으나 Process Heating에 적용하기 위한 연구개발이 정부의 적극적인 지원하에 여러 각도로 이루어지고 있음.

- 최근에 태양열 분야에서 급부상하고 있는 나라는 바로 중국이며, 이 중에서 Sunda 회사의 주요 생산품은 평판형 집열기와 진공관형 집열기 및 태양열온수기, Heat pipe 전기히터 등이 있으며, 이 회사는 독일의 Daimler-Benz Aerospace사와 합작회사로 1996년 6월에 설립되어 독일과의 3년간 국제공동연구를 바탕으로 진공관형 집열기를 연간 50만대 생산하는 공장을 완성하여 생산 및 판매중임.
- 유럽의 기술개발 및 보급의 핵심은 태양열 난방 및 온수기, 자연형 태양열 등이고, 수출을 목적으로한 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 m²)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.
- 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.
- 따라서 전통적 태양광 발전산업은 사용 환경과 필요에 따라 CPV를 도입하는 체제로 일부 다시 재편성될 가능성이 높으며, 실리콘계 태양전지와 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.

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 태양광-열 복합시스템을 개발하여 농업시설 난방 등의 에너지원으로 이용함으로써 농가의 에너지 비용을 줄이고, 농가 소득을 향상시킬 수 있으며 유류의 수입대체효과를 극대화시킬 수 있다. 태양광과 태양열을 동시에 활용하는 온실난방 기술개발과 같은 연구는 국내외적으로 큰 관심분야가 될 것이며, 본 연구에서 태양광 발전 및 태양열 집열이 매우 우수한 고효율의 태양광-열 복합시스템을 개발하여 태양에너지를 유효하게 온실난방에 이용함으로써 경제성뿐만 아니라 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 시스템으로 그 활용성이 크게 기대된다.

또한 본 연구에서 개발된 고효율 태양광-열 복합시스템의 구성요소는 태양광을 효과적으로 집광하는 프레넬렌즈, 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 온실 내의 열교환기를 통해 온실 내의 공기를 가열하며, 제어부를 통해 온실온도를 적절히 조절할 수 있다. 또한 태양광-열 복합시스템에서 생산된 전기에너지는 태양 추적장치, 펌프, 보조열원부 등의 에너지 공급원으로 이용되는 고효율의 에너지 독립형 태양광-열 복합 온실난방시스템으로 기술적인 측면에서 신기술인증 획득이 가능하여 저비용의 농가 보급이 크게 기대된다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 소형 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

1. 실험재료 및 방법

가. 집열시스템의 구성 및 제작

(1) 집열시스템의 설계 및 성능 평가 기준

추적식 집광형 태양열 집열기에 대한 설계 및 성능 평가 기준이 없어, 한국산업규격(KS)의 태양열 집열기 시험 방법-제1부:집열장이 부착된 압력강하가 발생하는 액체식 집열기의 열적 성능(KS B ISO 9806-1 : 2003)과 신재생에너지 설비심사 세부기준의 실외 열효율 시험 조건을 적용하여 실험을 수행하였다. 구름이 없이 청명한 날 유량별로 오전 9시부터 오후 4시까지 진행하였으며, 법선면 직달일사량이 700W/m^2 이상인 경우의 데이터만을 사용하였다. 열매체 유량 결정은 한국산업규격(KS B ISO 9806-1)에서는 제곱미터당 0.02kg/s 를 기준으로 하나 이 기준은 평판형 집열기를 기준으로 한 것으로 실제 실험에서 이 기준에 따라 유량 0.55l/min 을 적용하여 실험한 결과 효율이 너무 낮게 측정되었다. 따라서 추가로 예비실험을 진행하여 2l/min 전후에서 효율이 가장 높게 형성됨을 확인하고 2l/min 을 기준으로 그 전후 유량으로 결정하였다. 실험 유량 간격은 최소 1l 이상 차이가 있어야 유량별로 효율 차이를 확실하게 구분할 수 있기 때문에 1l 로 결정하였다.

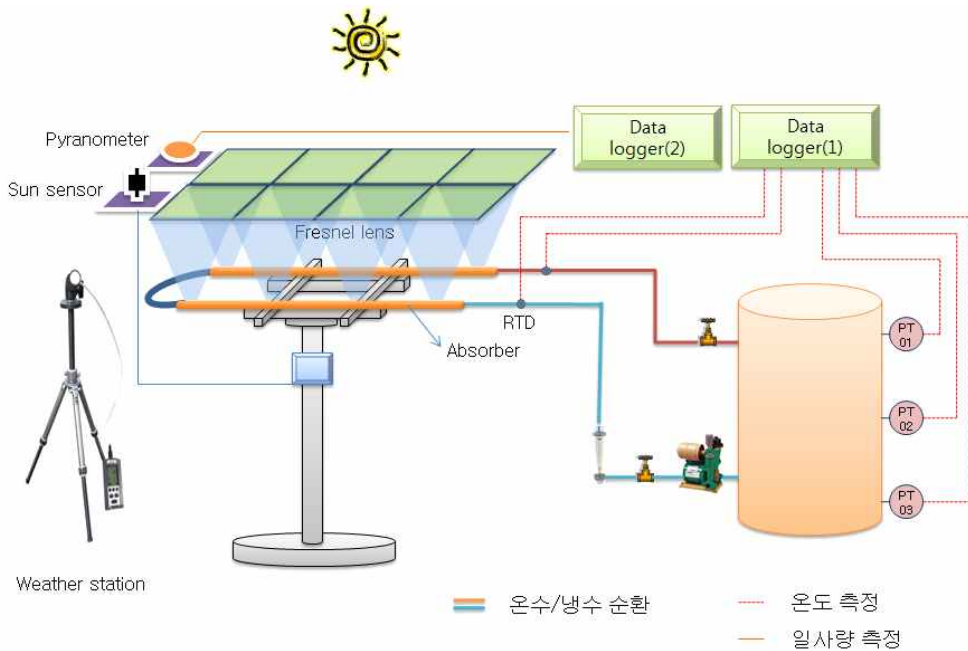
데이터 취득을 위한 입구와 출구의 온도 센서 위치도 200mm 이내로 제한한 한국산업규격(KS B ISO 9806-1)을 준수하였으며, 본 실험이 열매체 공급온도가 지속적으로 상승하면서 진행되기 때문에, 구간별 평균값에 대한 입구와 출구 온도 허용 범위에 대한 규정은 적용하지 않았다. [표 1-1]은 한국산업규격(KS B ISO 9806-1)의 측정 변수의 허용 오차 범위 규정이다.

[표 1-1] 측정 기간 중 측정 변수의 허용 오차 범위

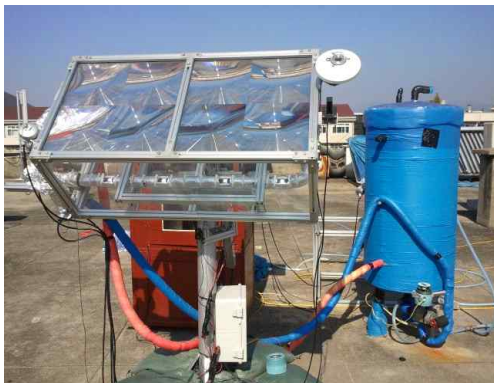
변수	평균값으로부터의 허용 오차	비고
집열면 전일사량	$\pm 50 \text{ W/m}^2$	법선면 직달일사량 적용
외기 온도	$\pm 1 \text{ K}$	
열매체 유량	$\pm 1 \%$	최대허용 범위 : $\pm 10\%$ 이하

(2) 집열시스템 전체 구성

전체시스템에서 주요 프레임은 알루미늄 프로파일을 이용하여 구성하였고, 집광을 위한 광학장치로는 프레넬렌즈를 사용하였으며, 추적장치는 linear actuator와 slew driver, 추적컨트롤러로 구성하여 2축 정밀 추적이 가능하도록 하였다. 집광된 초점부위에는 발생하는 열에너지를 흡수하기 위하여 사각 동파이프를 부착하고 물을 순환시켜 축열조에 저장 될 수 있도록 구성하였다. 열에너지 획득량을 측정하기 위해서 축열조와 흡수기 입출구에 측온저항센서를 부착하고 data logger로 기록하였다. [그림 1-1]은 집열시스템의 전체 구성도이며 [그림 1-2]은 실험 장면이다.



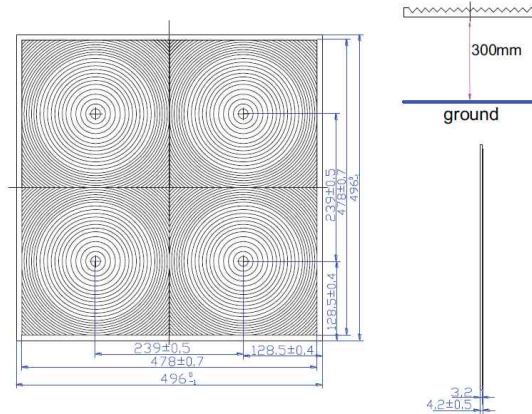
[그림 1-1] 태양열 집열시스템의 전체 구성도



[그림 1-2] 태양열 집열시스템 실험 장면

(3) 집광 장치의 구성

집광을 위한 광학장치는 파장대역(300nm~250nm) 전체에서 투과율이 높고 자외선에 강한 저철분 강화유리에 실리콘 재질을 접합하여 만든 SOG 타입의 프레넬렌즈를 사용하였다. 프레넬렌즈의 초점거리 300mm, 크기는 239mm × 239mm 이며 4개 렌즈가 [그림 1-3]과 같이 연결된 구조로 이 렌즈 2개를 연결하여 전체 집광면적은 $0.239\text{m} \times 0.239\text{m} \times 8\text{개} = 0.456968\text{m}^2$ 이다.



[그림 1-3] 프레넬 렌즈 구성도

투과율에 영향을 미치는 F Number(초점거리/렌즈직경)는 1.26이며, 집광비(렌즈 집광면적/초점 면적)는 571.21배, 반사와 색수차, 재료에 의한 흡수 등을 고려한 렌즈의 효율 82%를 적용하면 실제 집광비는 468.39배 이다.

[표 1-2] 프레넬 렌즈의 제원

재질	SOG(Silicon on Glass)
렌즈집광면적(A_{lens})	239mm±5mm × 239mm±5mm
렌즈 두께(Glass)	3.2mm
렌즈 두께(Silicon)	1.0mm
Groove Pitch	1.0mm
초점거리	300mm
유효초점거리	274.5mm
집광비	571.21배
투과율	82%
최대 입사각	21.7°

(4) 흡수기 구조

셀에서 발생하는 열에너지를 열매체에 흡수시키기 위해 외경 24mm×24mm, 두께 1.5mm인 사각 동파이프를 렌즈 초점 영역에 일치하도록 설치하였으며, 동파이프를 고정한 프레임의 네 모서리에 스크류를 부착하여 상하 방향으로 움직일 수 있도록 함으로서 10mm×10mm 크기의 집광 영역에 정밀하게 초점을 만들 수 있도록 하였다. 또한, 복사 에너지의 흡수율을 높이기 위해 동파이프 표면을 무광택 흑색페인트로 도색하였으며 동파이프의 열이 고정 프레임으로 전달되는 것을 방지하기 위해 단열처리를 하고 고정하였다. 흡수관 주변은 가교발포폴리에틸렌폼 1종(P1) 단열재로 감싸고 초점이 모이는 부분은 24mm×24mm 크기로 절단하였다. 단열재의 전도열전달계수는 0.043W/m K이고 밀도는 20kg/m³, 비열은 2000kcal/kg °C이다.

(5) 태양 추적 장치

태양 추적장치는 그림 2-4와 같이 태양 고도각 추적을 위한 linear actuator와 태양 방위각 추적을 위한 slew driver, 그리고 추적센서 및 컨트롤러로 구성하였다. 추적 센서는 동서남북 각 방향으로 포토다이오드를 설치하고 그 중심에 막대를 설치한 형태로 그림자 방향의 포토다이오드가 전류 변화를 감지하면 비교 회로를 통하여 해당 방향의 모터에 전류를 공급하여 구동되는 방식이다. 구동 주기는 6초 주기로 설정하였으며, 추적에 의한 입사각 오차는 0.025°이다.



[그림 1-4] 태양광 2축 추적 장치와 컨트롤러

(6) 데이터의 수집

(가) 온도 측정

온도 측정은 측온저항체(RTD : Resistance Temperature Detector) 센서를 사용하였으며, data logger는 GRAPHTEC사의 GL800 모델을 사용하여 측정하였다. 측정 정밀도는 [표 1-3]와 같다.

[표 1-3] Data logger와 온도센서 사양

구분	Measurement range	Accuracy	비고
Data Logger (GL800)	$-100 \leq TS \leq 1370^{\circ}\text{C}$	$\pm(0.05\% \text{ of rdg} + 1^{\circ}\text{C})$	K-type 서머커플 사용시
RTD(PT100 Ω)	-200 $^{\circ}\text{C}$ 이상 650 $^{\circ}\text{C}$ 미만	$\pm 0.15^{\circ}\text{C} + 0.002^{\circ}\text{C}/t$	DIN43760 Class A

(나) 일사량 측정(Pyranometer:전천일사계)

Pyranometer는 Middleton Solar사의 EQ08 모델로 태양 추적기에 부착하여 법선면 직달일사량을 측정하도록 하였으며, Data logger는 웰비안시스템의 KL-200을 사용하였다. Pyranometer의 사양은 irradiation 0-4000W/m², spectral range 300-3000nm, signal resolution은 0.5W/m² 미만이다. 외기온도와 풍량은 Davis Instruments사의 Wireless Vantag Pro2 Plus 기상관측장비를 이용하였다.



[그림 1-5] Pyranometer와 데이터 수집 장치

(7) 집열 효율 계산

흡수관에서 얻어지는 열량을 계산하기 위해서 식[1-1]을 사용하였으며 여기서 $Q_{absorber}$ 는 단위 시간당 흡수된 열량이며 \dot{m} 은 질량유량, C_p 는 물의 비열, ΔT 는 흡수관의 입구와 출구의 온도차다.

$$Q_{absorber} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [1-1]$$

투입된 태양 복사 에너지를 산출하기 위해서 식[1-2]를 사용하였으며 Q_{sun} 은 흡수관에 투입된 열량으로 일사량계에서 측정된 단위면적당 일사량(I_t)와 집열면적(A), 그리고 프레넬렌즈의 집광 효율(η_{con})의 곱으로 계산할 수 있으며 본 실험에서는 법선면 직달일사량을 사용하였으므로 집광효율은 100%를 적용하였다.

$$Q_{sun} = I_t \cdot A \cdot \eta_{con} \quad [1-2]$$

시스템의 효율을 계산하기 위해서 식[1-3]을 사용하였으며, 집열기 효율 특성을 분석하기 위해서 식[1-4]를 계산하여 시스템 효율과 비교 분석하였다.

$$\eta_{system} = \frac{Q_{absorber}}{Q_{sun}} \quad [1-3]$$

$$\eta = \eta_o - a \times (T_r - T_a) / I_a \quad [1-4]$$

위 두 식에서 η_{system} 은 시스템 효율, η 는 집열기 순간 효율, η_o 은 집열기 최대 효율, T_r 은 흡수기 입구와 출구의 평균 온도로 평판형 집열기에서는 입구온도인 T_i 를 사용하나 집광형 집열기에서는 입출구 온도차가 크기 때문에 평균온도를 사용한다. T_a 는 외부 온도이다(Gur M. et al., 2007).

(8) 법선면 직달일사량의 계산

집광형 시스템의 경우 직달일사량만을 사용함으로 효율 산출에 있어 직달일사량 측정이 무엇보다도 중요하다. 본 시스템의 경우 수평면 전일사량계인 Pyranometer를 추적 시스템에 부착하여 측정함으로써 측정된 값은 법선면 전일사량이다. 법선면전일사량 성분에서 산란일사량을 파악하기 위해 식[1-5]과 같이 직달일사량을 계산하였다(Christiana Honsberg, Stuart Bowden. 2006).

$$I_n = 1353 * [(1 - ah) * 0.7^{AM^{0.678}} + ah] \quad [1-5]$$

I_n 는 법선면 직달일사량(W/m²), 1353 W/m²은 태양상수(Solar Constant), 0.7은 대기에 입사되는 복사의 약 70%가 지구로 투과된다는 사실에 기인한 것이며 0.678은 대기층의 불균일성을 고려하여 관찰된 데이터를 맞추기 위해 피팅 할 때 사용하는 경험적인 값이다. AM(대기질량:air mass)은 태양광이 대기층을 통과한 최단거리에 대한 실제 통과한 거리의 비로 표시되며 AM이 클수록 대기를 통과한 거리가 길어진다. a는 보정을 위한 상수로 0.14를 사용했으며 h는 해당 지역의 해발고도이다. AM은 1/cos(θ)로 θ 는 천정각이고 θ 를 구하기 위해서 다음 공식들을 사용하였다.

$$\text{천정각}(\theta) = 90^\circ - \text{고도각}(\alpha) \quad [1-6]$$

$$LSTM = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT} \quad [1-7]$$

여기서 $LSTM$ 은 지방표준시간자오선(Local Standard Time Meridian), ΔT_{GMT} 는 GMT와 지방시(LT : Local Time)와의 차이 시간이다. 시각방정식(EoT : Equation of Time)은 지구궤도의 편심과 지구축의 기울기를 보정하는 경험식으로 식[1-8]과 식[3-9]을 사용하였다.

$$EoT = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad [1-8]$$

$$B = \frac{360}{365}(n - 81) \quad [1-9]$$

여기서 n 은 연중일이다. 시각보정계수(Time Correction Factor : TC)는 주어진 시간대 내에서 경도 변화에 따른 지방태양시(LST)의 변화를 보안하기 위한 식으로 식[1-10]을 사용하여 계산하였고, 지방태양시(LST : Local Solar Time)는 식[1-11]를 사용하여 계산하였으며, 지방태양시를 각도로 변환하는 시간각도(HRA : Hour Angle)는 식[1-12]를 사용하였다.

$$TC = 4(\text{Longitude} - LSTM) + EoT \quad [1-10]$$

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad [1-11]$$

$$HRA = 15^\circ (LST - 12) \quad [1-12]$$

적도와 지구중심으로부터 태양 중심까지를 일직선으로 연결한 선과의 각도로 지구자전축이 23.5° 기울어져 있기 때문에 지구의 공전에 따라 변화하는 경사각(declination angle)을 구하기 위해서는 식[3-13]을 사용하였으며, 수평선으로부터 측정한 태양 높이의 각도인 고도각(elevation angle)은 식[3-14]를 사용하였다. 여기서 φ 는 측정 지점의 위도이다.

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(n-81)\right] \quad [1-13]$$

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos(HRA)] \quad [1-14]$$

위 과정을 거쳐 천정각(θ)를 구하고 AM와 법선면직달일사량(I_n)을 구하여 효율 분석에 사용하였다. 이 식들을 이용하여 2012년 10월 16일 12시의 법선면직달일사량을 구해보면 [표 3-4]와 같다. 계산에서 사용한 위도는 37.53도, 경도는 127.44도이며, 측정된 법선면 전일사량의 1일 평균값에서 계산으로 구한 법선면직달일사량의 1일 평균값의 차이로 산량일사량을 계산하였다.

[표 1-4] 법선면직달일사량의 산출 예

경사각	천정각	AM	법선면 직달일사량 (계산값)	법선면 전일사량 (측정값)	평균 산란 일사량	법선면 직달 일사량
-9.97°	47.62°	1.48	856.04W/m ²	1000.5W/ m ²	145.49W/ m ²	855.01W/ m ²

(9) 전일사량 측정에 의한 법선면 직달일사량의 산출

수평면 전일사량계(pyranometer) 두 개를 사용하여 법선면 직달일사량(I_D)을 계산하여 사용하는 방법으로도 효율을 계산해 보았다. Pyranometer 하나를 수평면 전일사량 측정(I_t) 측정을 위해 수평면에 설치하였으며, 다른 Pyranometer 하나는 법선면 전일사량(I_n)을 측정을 위해 추적시스템의 집광면과 나란하게 설치하여 태양을 추적하면서 측정이 이루어지도록 하였다. 그리고 Collares-Pereira와 Rabl이 제안한 산란비(DR)를 구하는 이론식 식[3-15]를 적용하여 지표면산란일사량(I_s)를 구하고 식[3-16]을 이용하여 법선면 직달일사량을 구하였다(안현갑 등, 2006).

$$DR = I_s/I_t = 0.775 + 6.53 \times 10^{-3}(W_s - 90) - [0.505 + 4.55 \times 10^{-3}(W_s - 90)] \times \cos(115 \times K_t - 103) \quad [1-15]$$

$$I_D = I_n - I_s \quad [1-16]$$

여기서 I_s 는 지표면 산란일사량(W/m^2), I_t 는 수평면 전일사량(W/m^2), DR 은 산란비(I_s/I_t), W_s 는 일몰시간각, K_t 는 청명지수(=지표면 일사량/대기외 일사량)이다. 식 [1-15]의 일몰시간각(W_s)은 식[1-17]을 사용하여 구하였으며, 일몰시간각을 구하기 위해 필요한 태양적위(δ)는 식[1-18]을 사용하였다.

$$W_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad [1-17]$$

$$\delta = 23.45 \sin[(360/365)(284+n)] \quad [1-18]$$

여기서 ϕ 는 측정지점의 위도, n 은 연중일이다. 또한 청명지수(K_t)는 측정한 법선면 전일사량(I_n)과 식[3-19]를 사용하여 구한 대기외 일사량을 이용하여 산출하였다.

$$I_o = I_{sc}[1 + 0.033 \cos(360n/365)] \quad [1-19]$$

여기서 I_o 는 대기외 일사량(W/m^2), I_{sc} 는 태양상수($1353 W/m^2$), n 은 연중일이다. 위 식을 적용하여 2012년 10월 16일 12시의 법선면직달일사량을 계산하면 [표 1-5]와 같다. 여기서 위도(ϕ)는 37.52도 태양적위(δ)는 -9.97도이고 일몰시간각(W_s)은 82.25도이다.

[표 1-5] 전일사량 측정값을 이용한 법선면직달일사량의 산출 예

대기외태양강도(I_o)	수평면전일사량(측정값)	법선면전일사량(측정값)	일청명지수(K_t)	산란일사량(I_D)	산란비(DR)	법선면직달일사량
1364.59	686	1000.5	0.73	192	0.28	809

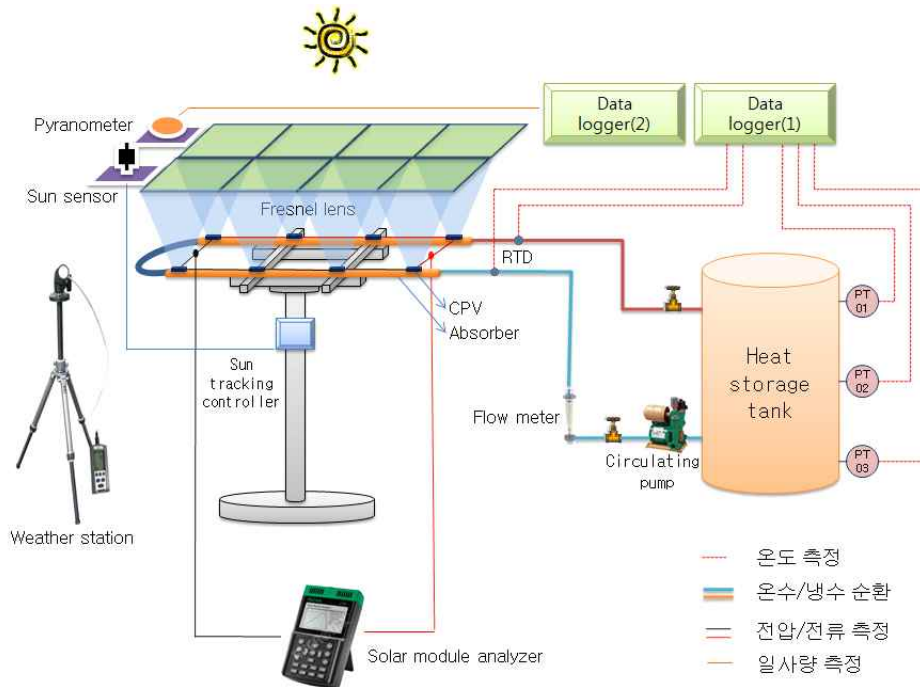
나. 복합시스템의 구성과 제작

(1) 복합시스템의 설계 및 평가 기준

복합시스템의 집열기 성능 평가 기준은 집열시스템과 동일하게 한국산업규격(KS B ISO 9806-1)를 준수하였으며, CPV 셀에 대한 성능 평가는 한국산업규격의 집광형 태양광 발전(CPV) 모듈 및 조립품 설계 검증 및 형식승인(KS C IEC 62108:2009) 기준에 따라 청명한 날 법선면 직달일사량이 $700W/m^2$ 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.

(2) 복합시스템의 장치 구성

전체 시스템 구성은 SOG 프레넬 렌즈를 이용한 고집광 태양열 집열시스템 실험 장치를 그대로 사용하였고, 흡수기 표면 초점 위치에 CPV 셀을 부착하고, 전압, 전류 출력을 측정하기 위해 solar module analyser를 연결하였다.



[그림 1-6] 복합시스템의 전체 구성도



[그림 1-7] 복합시스템의 실험 장면

또한 CPV 셀과 동파이프 사이에 열전달을 원활하게 하기 위해 [표 3-6]과 같은 사양을 갖는 thermal grease를 도포한 후 부착하였다.

[표 1-6] Thermal grease property

Thermal conductivity	4.3W/mK
Temperature range	-45°C to 200°C
Viscosity	320 poise
Thermal resistance	0.75°C/W

(3) 복합시스템의 CPV 셀 및 모듈 구성

CPV 셀은 EMCORE사의 CTJ(Concentrating Triple-Junction) Photovoltaic 10mm×10mm Cell을 구리 기판에 바이패스 다이오드를 포함시켜 조립한 제품을 사용하였으며 제조사에서 제공하는 셀 및 어셈블리의 사양과 특성은 [표 3-7], [표 3-8], [표 3-9]과 같다.

[표 1-7] Nominal temperature coefficients at 50 mW/cm²

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 ² /°C	570	PPM/°C
Responsivity@Vmp	7.7	x10 ⁻⁵ Amps/Watt/°C	570	PPM/°C

[표 1-8] Typical current-voltage parameters at 50mW/cm², 25°C

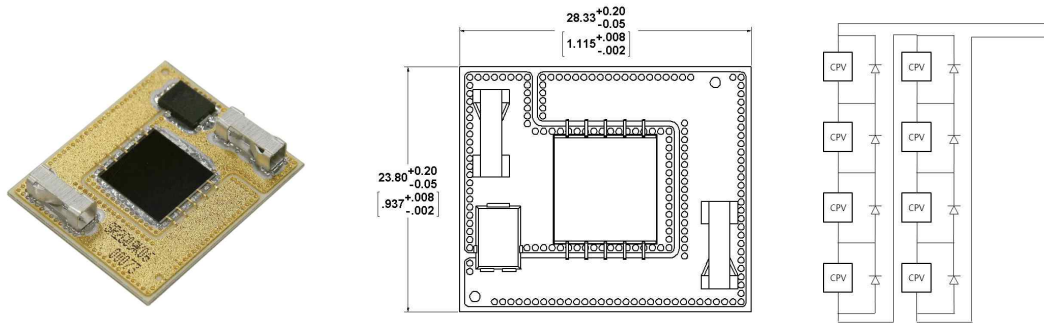
Parameter	Value at 25°C 50mW/cm ²
Efficiency (%)	38.5
Isc (Amps)	7.06
Imp (Amps)	6.92
Voc (Volts)	3.15
Vmp (Volts)	2.75

[표 1-9] CTJ receiver assembly specification

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

8개의 셀은 [그림 18]과 같이 4행 2열로 배치하였으며 모든 셀을 직렬로 연결하여 약 24V의 전압이 출력 될 수 있도록 하였고, 셀의 설치 위치는 프레넬렌즈의 초점거리 300mm보다 25.5mm 가까운 거리에 위치하도록 하여 조사되는 면적이

10mm×10mm가 되도록 하였으며, 프레임의 사각 모서리에 부착된 1mm 피치를 가지는 스크류 조절하여 초점의 위치와 크기를 정밀하게 조절하였다.



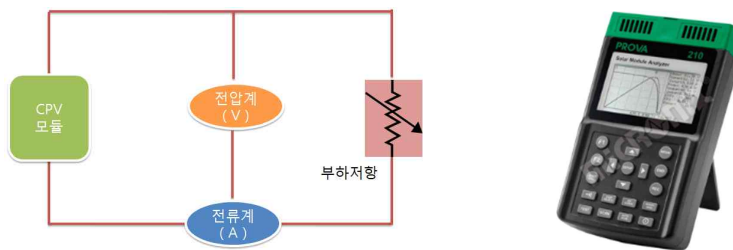
[그림 1-8] CPV 어셈블리 구조 및 연결 구성도

(4) 복합시스템의 전압 전류 측정 및 효율계산

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 [표 3-10]과 같으며, solar module analyzer의 측정 원리는 [그림 3-9]와 같다.

[표 1-10] Solar module analyzer property

Measurement	Range	Resolution	Accuracy
DC Voltage	0~10V	0.001V	±1%±(1% of Vopen ±0.1V)
	10~60V	0.01V	±1%±(1% of Vopen ±0.1V)
DC Current	0.01~10A	1mA	±1%±(1% of Ishort ±9mA)
	10~12A	10mA	±1%±(1% of Ishort ±0.09A)



[그림 3-9] 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[2-23]과 식[2-24]을 이용하여 계산한다(윤경훈, 2012).

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad [1-20]$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad [1-21]$$

여기서 FF는 충전률, η 은 효율, P_{in} 입사된 일사 에너지이다.

다. CPV 모듈의 구성과 제작

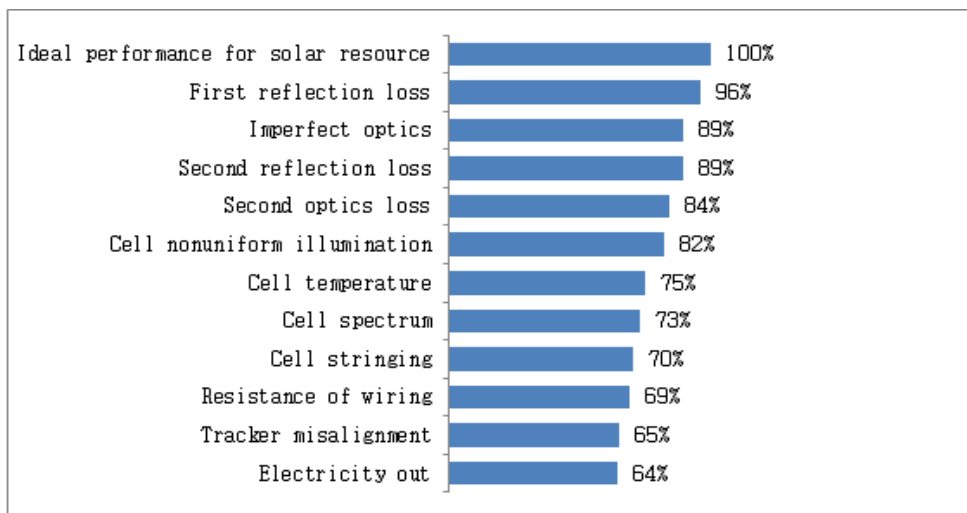
(1) CPV 모듈의 전체 구성과 설계 기준

CPV 셀의 집광부위에는 고온의 열점(hot spot)이 존재하게 되고 이 부분의 온도는 수에서 수십배의 고열유속을 가지기 때문에 냉각시스템이 무엇보다도 중요하다(도규형 등, 2011). 이에 복합시스템의 열 흡수기를 부착한 수냉식 방법과 일반적으로 사용하는 열분산기 모듈(heat spreader module)을 이용한 공랭식 방법의 비교를 위해 히트싱크를 부착한 CPV 모듈을 제작하여, 효율을 측정하고 성능을 비교하였다. CPV 모듈의 추적장치 및 데이터 수집장치는 복합시스템에서 사용한 장치를 그대로 사용하였으며 CPV 셀에 대한 성능 평가는 복합시스템과 동일하게 한국산업규격의 집광형 태양광 발전(CPV) 모듈 및 조립품 설계 검증 및 형식승인(KS C IEC 62108:2009)기준을 준수하였다.



[그림 1-10] CPV 모듈 실험 장면

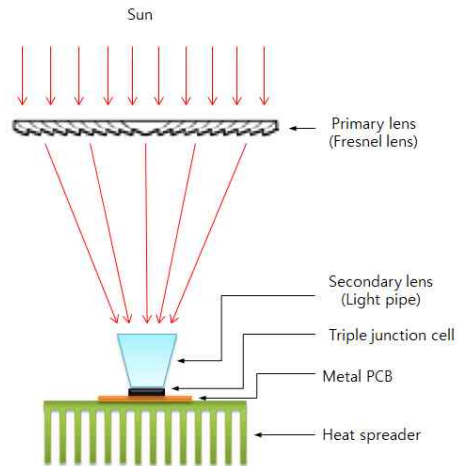
일반적으로 태양전지 셀은 면적이 증가하거나 모듈을 구성하면 효율이 감소한다 (Christiana Honsberg, Stuart Bowden, 2006). 본 시스템에서 사용한 셀의 최고 효율은 38.5%이지만 옥외 테스트에서의 모듈 최고 효율은 28.2%에 불과하다(한원석, 2010). 따라서 모듈 제작에 있어 효율 감소를 최소화하기 위해 그림 [1-11]와 같은 효율 감소 요소들을 충분히 고려하여 제작하였다.



[그림 1-11] 일반적인 CPV 모듈의 손실 요인

(2) CPV 모듈의 장치 구성

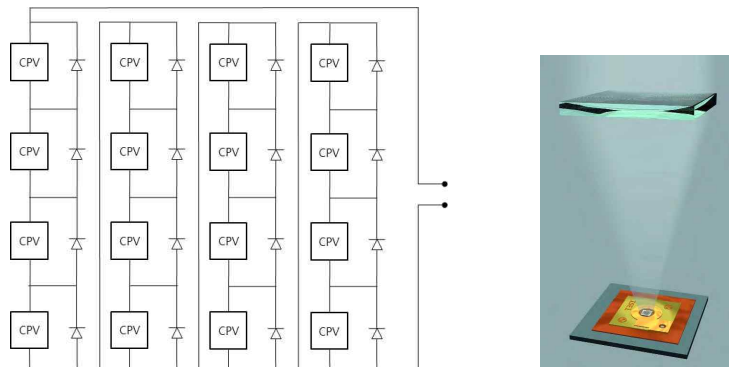
SOG 타입의 프레넬렌즈를 사용하였으며 240mm×240mm 크기의 렌즈 16개가 하나의 강화유리 평판에 구성된 구조로 집광 면적은 0.9216m²이며 초점거리는 256mm이다.



[그림 1-12] CPV 셀을 이용한 집광 발전 시스템 구조

또한 10mm²의 셀에 정확하게 집광시키기 위해 그림 3-11과 같이 BK7 재질의 2차 렌즈를 부착하였다. 2차 렌즈의 크기는 윗면이 20mm×20mm이고 아랫면은 셀의 크기와 동일한 10mm×10mm이며 높이는 30mm이다.

CPV 셀의 구성은 복합시스템과 동일하게 Emcore 사의 CTJ Receiver_10mm를 사용하였으며 16개의 셀을 [그림 1-13]과 같이 모두 직렬로 연결하여 약 48V의 전압이 출력되게 구성하였다.



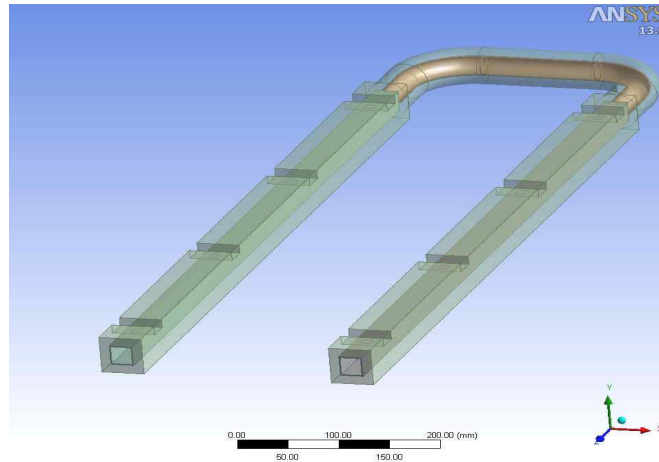
[그림 1-13] CPV 셀 연결 구성도 및 모듈 내부 구조

라. CFD를 이용한 열매체 및 흡수관 주변의 열유동 해석

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 진행한 후 그 결과를 실험결과와 비교하여 실험의 타당성 및 결과의 정확성을 검증하였다.

(1) 모델의 설정

실험장치의 흡수관 내부 및 주변의 열유동 분포를 해석하기 위해 [그림 1-14]와 같이 모델링하였으며, 정확한 해석을 위해 모델은 다음과 같이 단순화하여 구성하였다.



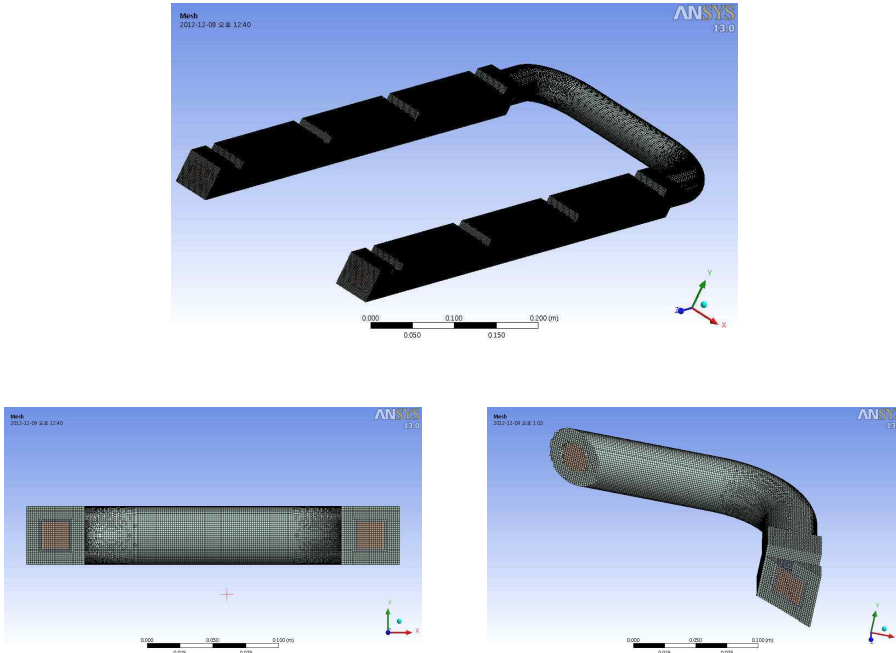
[그림 1-14] CFD 해석 모델

- ① 실제 시스템의 흡수관은 2열로 구성되어 있어 기하학적으로는 좌우 대칭의 구조를 갖고 있으나 열매체가 흐르면서 점점 온도가 높아짐으로 symmetry 구조로 해석 할 경우 해석 시간은 단축 할 수 있으나 결과에 차이가 발생 할 수 있어 전체 모델을 대상으로 해석을 진행하였다.
- ② 흡수관은 외경이 24mm×24mm×817mm의 크기에 1.5mm 두께를 갖는 사각 동파이프로 필렛(fillet) 부분은 정사각형 모양으로 단순화하였으며, 두 개의 흡수관을 연결하는 부분은 고무 재질의 내경 21mm 파이프를 단순화 하고, 꺾이는 부분도 반지름 60mm의 1/4 원으로 단순화 하였다.
- ③ 초점이 모이는 부분은 imprint 기능을 이용하여 흔적을 만들어 경계조건을 줄 수 있도록 하였다.
- ④ 흡수관 주변은 10mm 두께의 단열재로 감싸고 초점이 모이는 부분은 24mm×24mm 크기로 잘라낸 형태로 단순화하였다.

(2) 격자 생성

해석 모델은 하나의 파트에 열매체인 물이 흐르는 영역, 흡수관인 사각 동파이프, 연결 고무호스 그리고 단열재의 네 개의 body로 구성하고 각각을 fluid와 solid로 설정하였다. 격자는 CutCellMeshing 방법을 이용하여 생성하였고 최소 사이즈는

1.5mm로 설정하였으며, 형상은 가장 해석의 정확도가 높은 hexahedron 형상으로 구성하였다. 관심 영역에 격자를 조밀하게 생성하는 inflation 기능이나 sizing 기능을 사용하면 격자의 개수는 줄일 수 있으나 격자의 품질이 떨어져 적용하지 않았다.



[그림 1-15] 격자 생성

격자의 node는 1,199,721개이며, elements는 1,157,036개 이다. 직교품질(orthogonal quality)은 0부터 1사이의 값으로 1에 가까울수록 좋은 품질을 의미하며 비대칭도(skewness)도 0부터 1의 값을 가지며 0에 가까울수록 좋은 품질을 나타내는데 본 해석모델의 경우는 전체 격자가 육면체(hexahedron)로 구성되어 있어 직교품질은 0.99의 값을 가지며 비대칭도는 3.20E-02으로 격자품질이 매우 우수함을 알 수 있다.

[표 1-11] Mesh quality

구분	Skewness	Orthogonal quality
Min	1.31E-10	9.64E-02
Max	0.99	1
Average	3.20E-02	0.99
Standard deviation	0.105	5.03E-02

(3) CFD 해석

해석을 위한 Solver는 저속의 비압축성 유동에서부터 고속의 압축성 유동까지 넓은 영역에서 적용이 가능한 압력기반(pressure-based) Solver를 사용하였으며, 연속방정식과 운동량방정식을 결합한 압력-속도 Coupled 알고리즘을 선택하여 해석하였다. 해석 모델 선택에서 에너지 방정식을 활성화하고, 점성 모델(viscos model)중 층류(laminar) 모델을 사용하였으며 정상상태, 비압축성 유동으로 3차원 해석으로 설정하였다. 흡수관 주변의 전도 및 대류, 복사 열전달을 해석하기 위한 지배방정식은 연속 방정식 식[1-22], 운동량방정식 식[1-23], 에너지방정식 식[1-24]을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho V = 0 \quad [1-22]$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g + \nabla \cdot \tau'_{ij} - \nabla p \quad [1-23]$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \text{div}(k \nabla T) + \tau'_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad [1-24]$$

여기에서 뉴튼유체에 대한 점성응력은 식[1-25]로 표현 된다.

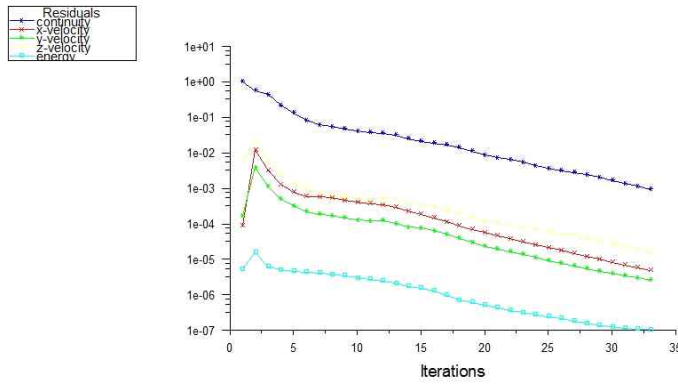
$$\tau'_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \text{div } V \quad [1-25]$$

정확한 해석을 위해 2l/min, 30℃, 관직경 0.021m를 주고 식[1-26]을 적용해 레이놀즈넘버(Re)를 구해본 결과 1,929로 층류 유동임을 확인 할 수 있었다.

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad [1-26]$$

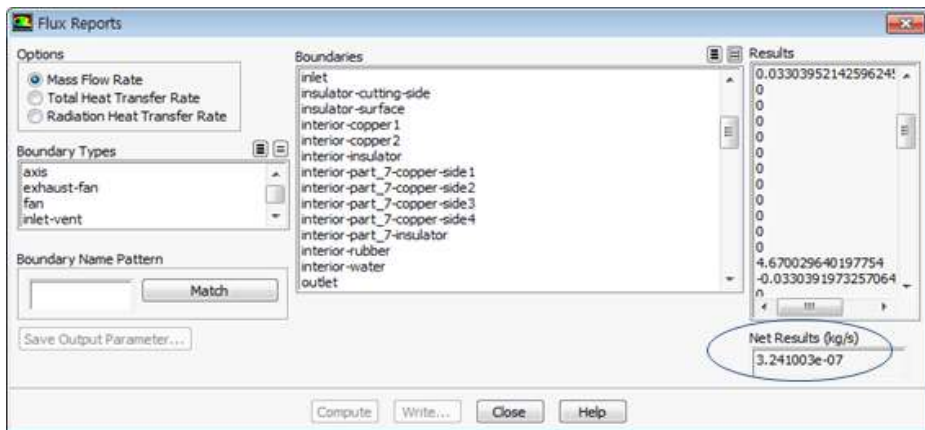
여기서 ν 는 동점성계수, v 는 속도, d 는 특성길이이다.

해석 결과의 타당성을 확인하기 위한 수렴성 확인은 잔차이력(residual history) 모니터링을 통하여 알 수 있다. 보통 에너지에 대한 잔차(residual)가 10^{-6} 이하였을 때 수렴된다고 판단하는데 본 해석에서는 32~36번 반복계산 후 [그림 1-15]와 같이 수렴되는 결과를 나타내었다.

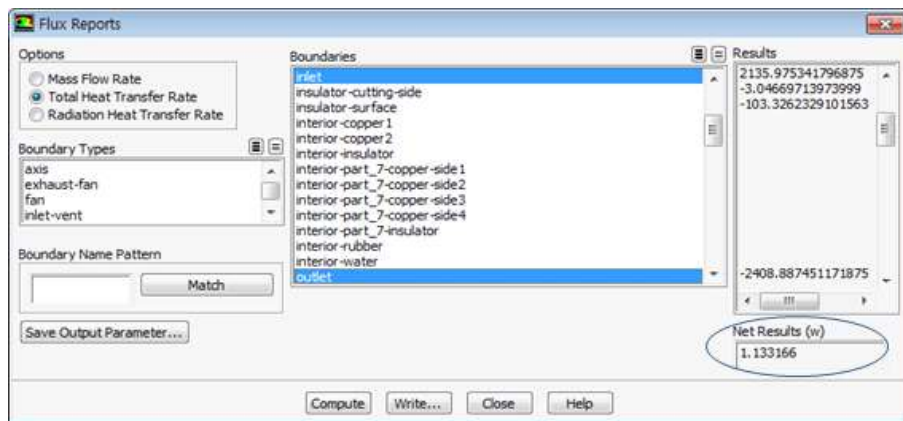


[그림 1-16] 해석에 대한 수렴 확인

또한 해석의 정확성을 판단하기 위해서 “Total heat transfer rate”와 “Mass flow rate”를 확인해서 전체 유체의 단위면적을 통과한 물리량의 벡터 합이 불균형이 해석 영역 경계를 통과하는 가장 작은 양과 비교하여 1% 이내의 값이 되어야 하는데 본 해석에서는 [그림 1-17], [그림 1-18]과 같이 매우 작은 차이만을 보임으로 해석의 결과가 타당하고 정확하다고 할 수 있다.



[그림 1-17] Flux reports for mass flow rate



[그림 1-18] Flux reports for total heat transfer rate

2. 실험결과 및 분석

가. 집열시스템 성능 실험 및 결과

(1) 집열시스템의 실험 조건 및 환경

실험은 유량별로 2012년 10월 10일부터 11월 20일 사이에 이루어 졌으며, 실험 장소는 강원대 농생대1호관 옥상(위도:37°52', 경도:127°44')이고, 열매체 용량은 40L, 열매체 입구 온도는 30℃ ~ 55℃ 범위에서 진행되었다. 실험은 축열조의 온도를 30℃로 설정 한 후 열매체를 순환시켜 흡수관 입구에서 열매체 온도가 점차 상승 할 수 있도록 구성하였으며, 유량은 1l/min, 2l/min, 3l/min, 4l/min로 변경하면서 입구와 출구의 온도를 측정하였다.

[표 1-12] 집열시스템의 유량별 실험 환경 조건

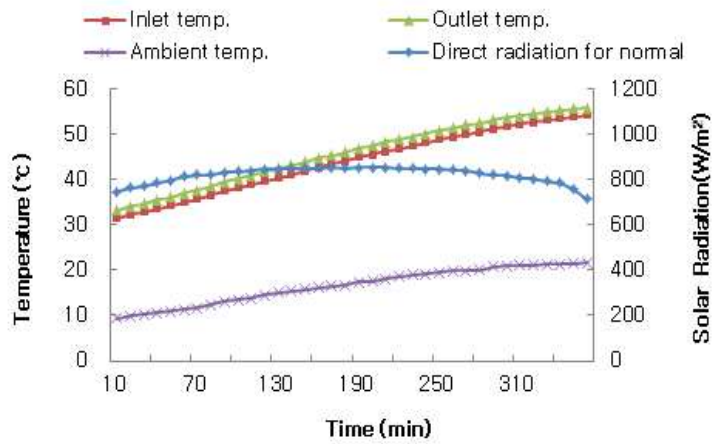
유량	실험일시	입구온도(℃)	일사량(W/m ²) (최소/최대)	외기온도(℃)	풍량(m/s) (최소/최대/평균)
1l/min	2012/11/18	30.0~51.2	729/822	2.5~8.7	0.2/2.2/1.1
2l/min	2012/10/16	31.4~54.1	716/855	9.2~22.1	0.0/1.0/0.5
3l/min	2012/10/14	30.8~51.0	717/864	12.0~21.2	0.2/1.3/0.7
4l/min	2012/10/12	33.2~50.1	718/871	10.7~21.0	0.4/1.6/0.8

데이터 수집에 있어 정확한 온도 측정을 위해 흡수관 입구와 출구에 각각 PT100Ω 축온저항센서(RTD)를 2개씩 설치하고 1분 간격으로 측정하였으며, 보다 정확한 분석을 위해 온도별 평균값을 산출하여 사용하였다. 또한 태양광이 흡수관을 가열시켜 열매체에 흡수되기 위해서는 시간이 소요되고, 또한 유량에 따라 열매체가 흡수관을 통과하는 시간이 약 10초에서 1분 정도 소요됨으로 입력과 출력 사이에 시간차이가 발생할 수 있어 그 영향을 충분히 반영하기 위해 산출된 결과를 10분 단위로 평균하여 시간평균 효율도 산출하였다.

(2) 집열시스템의 측정 결과 및 분석

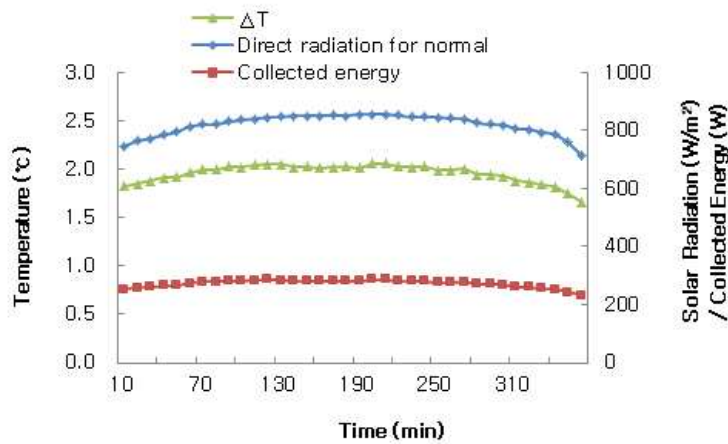
(가) 집열시스템 유량 2l/min에 대한 10분 평균 데이터 분석

집열시스템의 유량 2l/min에 최고 효율을 나타냄으로 실험 결과를 자세히 분석해보면 다음과 같다. 우선 측정 결과로 [그림 1-19]와 같이 전반적으로 직달 일사량은 시간 경과에 따라 상승 후 정오를 기점으로 하락하며, 외기온도는 시간 경과에 따라 증가하지만 오후에 그 증가세가 둔화되고 그에 따라 열매체 온도도 증가세가 둔화된다.



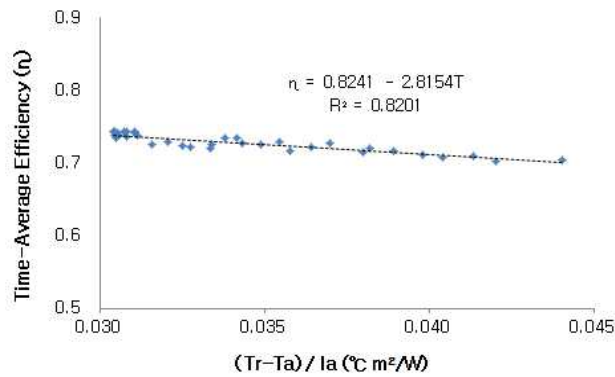
[그림 1-19] 집열시스템의 시간에 따른 일사량, 입출구온도, 외기온도 변화

[그림 1-20]은 일사량의 변화와 입출구 온도차, 그리고 집열된 에너지의 변화를 비교하여 볼 수 있는 그래프로, 일사량의 변화가 입출구의 온도차이로 나타나고 그 결과에 따라 집열된 에너지도 같은 추세로 변화된다.



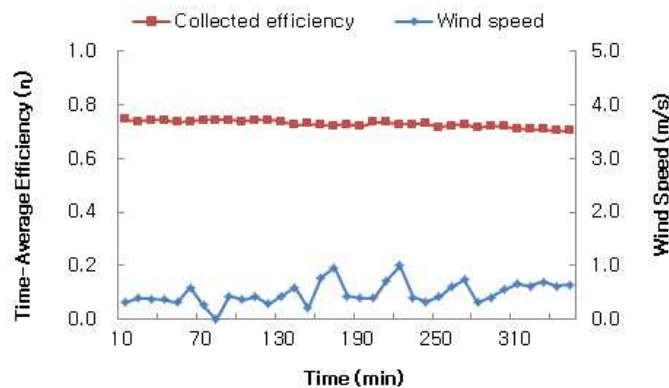
[그림 1-20] 집열시스템의 시간에 따른 일사량, 입출구 온도차, 집열량 변화

외기온도와 열매체의 온도 차이에 의한 영향을 확인하기 위해 [그림 1-21]에서 $(T_r - T_a)/I_a$ 값의 변화에 따른 효율곡선을 살펴보면, 전체적으로는 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 증가함에 따라 효율이 소폭 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 집열기 온도와 외기온도 차이가 커짐으로 인해 주변으로의 대류 열손실이 증가한 것이며, 일반적인 평판형 집열기에서 보이는 특징이다.



[그림 1-21] 집열시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 시간평균 효율

본 시스템은 효율을 증가시키기 위해 흡수관 주변을 아크릴로 막아 바람의 영향을 차단하고 온실효과를 유발할 수 있도록 제작되었다. [그림 1-22]를 보면 바람이 직접적으로 효율에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 명확하게 하기 위해 아크릴판을 제거하고 흡수관 주변의 단열재를 제거한 상태로 추가 실험을 실시하였으며 그 결과는 뒤에서 확인 할 수 있다.

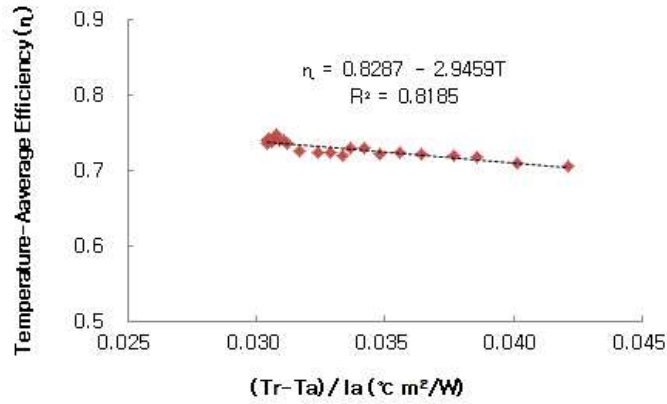


[그림 1-22] 집열시스템의 풍속 변화와 효율 비교

(나) 집열시스템 유량 2ℓ/min에 대한 온도 평균 데이터 분석

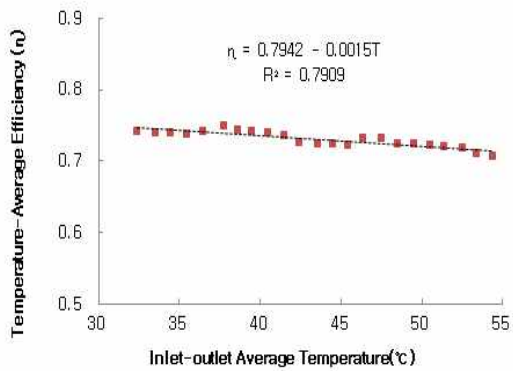
열매체 입구온도를 1°C 간격으로 온도를 기준으로 효율 평균값을 구하고 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 변화에 따른 분산형 그래프를 그려보면 [그림 1-23]과 같다. 그래프에서 데이터가 한 곳에 집중되는 것은 오전에 열매체 입구 온도와 외기온도가 비슷한 비율로 상승하여 $(T_r - T_a)/I_a$ 값의 차이가 작기 때문이며, $(T_r - T_a)/I_a$ 가 증가함에 따라 효율이 하강하는 것은 열매체 온도가 상승함에 따라 손실이 증가하기 때문이다.

[그림 1-23]에서 보면 효율 추세선이 선형적이기 때문에 $(T_r - T_a)/I_a$ 값이 0일 때 절편이 0.8287로 입출구 온도 평균과 외기 온도가 같다면 얻을 수 있는 효율이다.

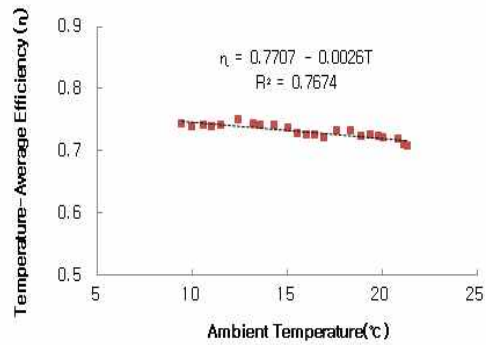


[그림 1-23] 집열시스템의 온도평균 효율

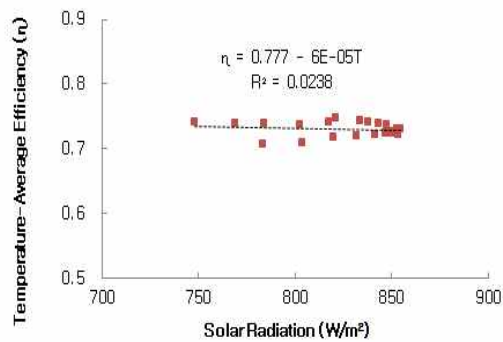
손실 요인의 각각에 대한 영향을 확인하기 위해 입구온도, 외기온도, 일사량에 대해 효율 변화를 [그림1-24]에 표시하였다. [그림1-24] (a)에서 보면 입출구 평균온도의 증가에 따라 효율이 감소하는 경향을 보이는 반면 [그림 1-24] (b)에서와 같이 외기 온도가 상승함에도 효율이 하강하는 것은 입출구 평균온도의 증가율이 외기 온도의 증가율보다 크기 때문이다. [그림 1-24] (c)에서와 같이 일사량의 변화에 따른 효율 변화는 그 상관성을 확인할 수 없다.



(a) 입출구 평균온도에 따른 효율



(b) 외기 온도에 따른 효율

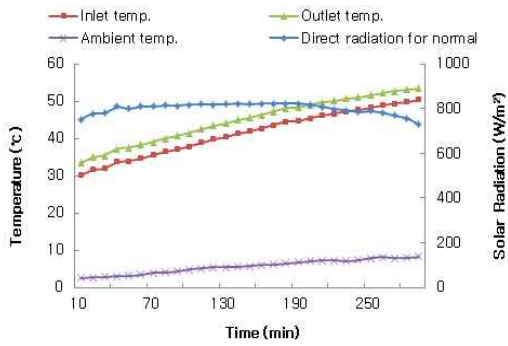


(c) 일사량에 따른 효율

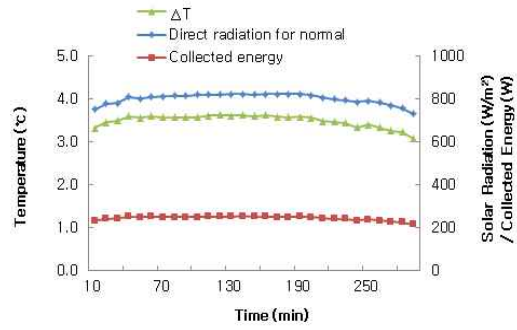
[그림 1-24] 집열시스템의 온도 평균 효율 분석

(다) 집열시스템의 유량 1l/min에 대한 10분 평균 데이터 분석

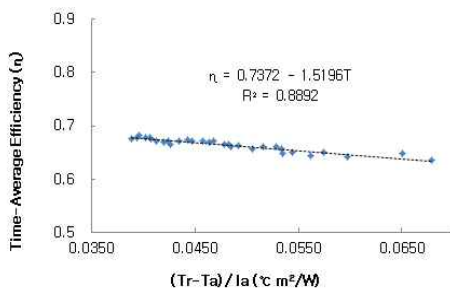
유량 1l/min에 대한 실험은 2012년 11월 18일 09시부터 16시 사이에 [그림 1-25] (a)와 같은 조건에서 진행됐다. [그림 1-25] (b)는 일사량 및 외기온도의 변화에 따라 수집된 에너지의 유사하게 변화되고 있다. [그림 1-25] (c)는 시간평균 효율 그래프이고 [그림 1-25] (d)는 온도평균 효율 그래프이다. 유량 1l/min에 대한 실험은 외기 온도가 낮은 환경에서 이루어져 $(T_r - T_a)/I_a$ 가 다른 유량의 실험에서 보다 큰 값을 보이고 있다.



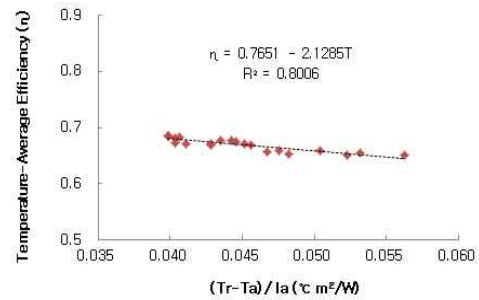
(a) 일사량 및 외기온도 변화와 입출구 온도 비교



(b) 일사량 변화와 입출구 온도차 및 축열 에너지 비교



(c) 시간평균 효율

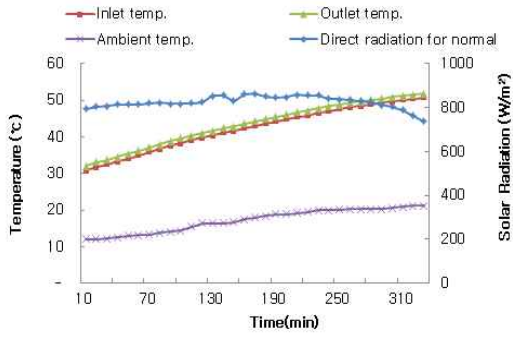


(d) 온도평균 효율

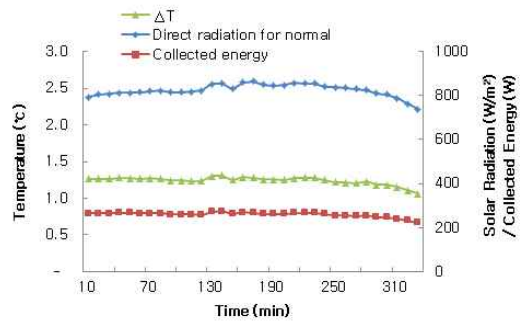
[그림 1-25] 집열시스템의 유량 1ℓ/min에 대한 효율 분석

(라) 집열시스템의 유량 3ℓ/min에 대한 10분 평균 데이터 분석

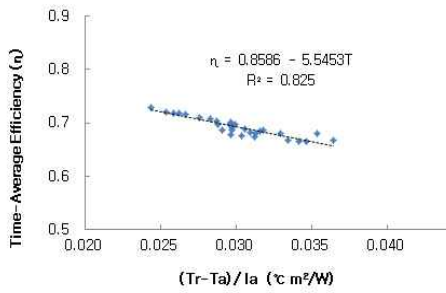
유량 3ℓ/min에 대한 실험은 2012년 10월 14일에 실시되었으며 [그림 1-26] (a)~(d)에 그 결과를 나타내었다. 측정 중간에 구름의 영향으로 일사량이나 외기 온도의 변화가 불규칙한 부분이 있으나 전체적인 추세는 2ℓ/min의 경우와 큰 차이를 보이지는 않는다.



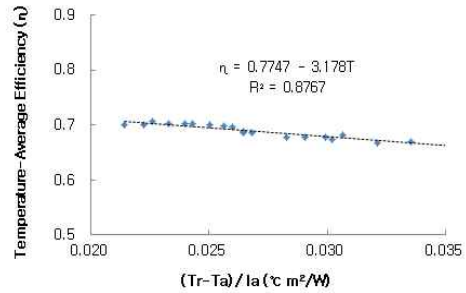
(a) 일사량 및 외기온도 변화와 입출구 온도 비교



(b) 일사량 변화와 입출구 온도차 및 축열 에너지 비교



(c) 시간평균 효율

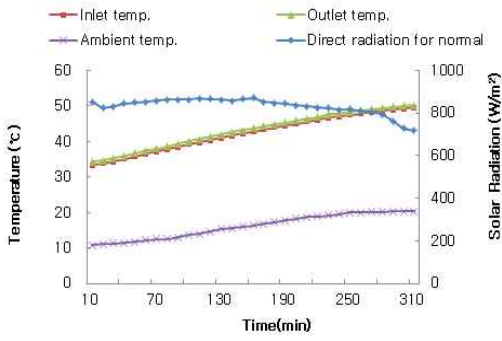


(d) 온도평균 효율

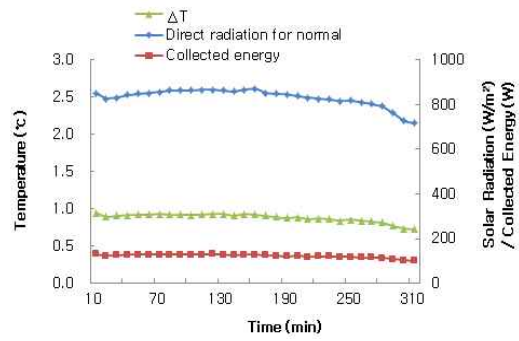
[그림 1-26] 집열시스템의 유량 3ℓ/min에 대한 효율 분석

(마) 집열시스템의 유량 4ℓ/min에 대한 10분 평균 데이터 분석

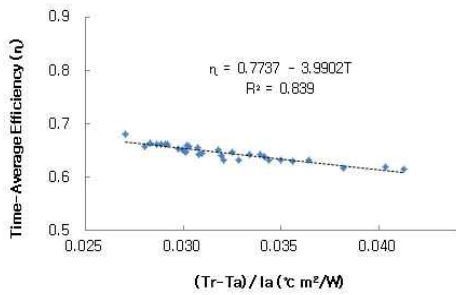
[그림 1-27] (a)~(d)는 유량 4ℓ/min에 대한 실험 결과로 전체적으로는 1ℓ/min~3ℓ/min 실험과 큰 차이는 없으며, 기울기가 다른 유량에 비하여 좀 더 큰 값을 나타내고 있다.



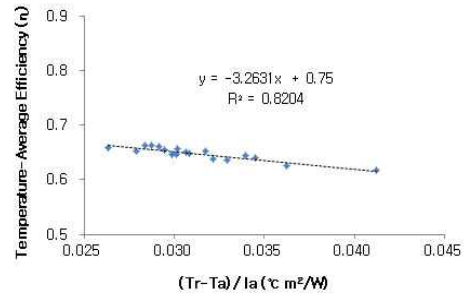
(a) 일사량 및 외기온도 변화와 입출구 온도 비교



(b) 일사량 변화와 입출구 온도차 및 축열 에너지 비교



(c) 시간평균 효율



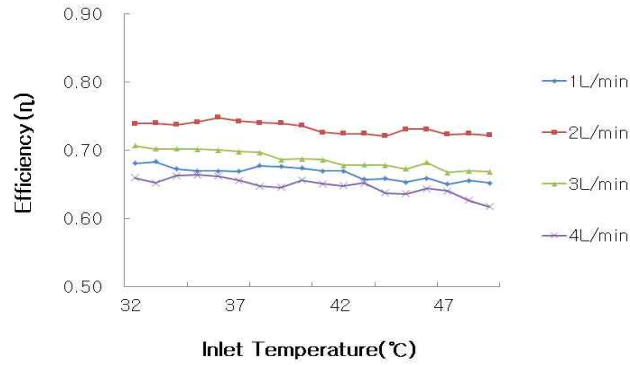
(d) 온도평균 효율

[그림 1-27] 집열시스템의 유량 4l/min에 대한 효율 분석

(3) 집열시스템의 유량별 효율 비교 분석

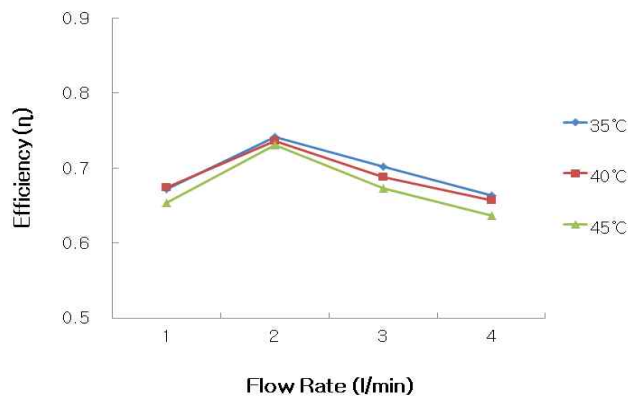
집열시스템의 1l/min ~ 4l/min 에 대한 실험 결과를 [그림 1-28] ~ [그림 1-29]에 그래프로 나타냈었으며 그 결과를 분석해 보면 다음과 같다.

먼저 입구 온도에 따른 효율을 비교해 보면 유량 2l/min가 최고 효율을 보이며 다음은 3l/min, 1l/min, 4l/min 순으로 측정되었다. 또한 열매체 온도가 증가하면서 모든 유량에서 효율이 감소하는 경향을 보인다.



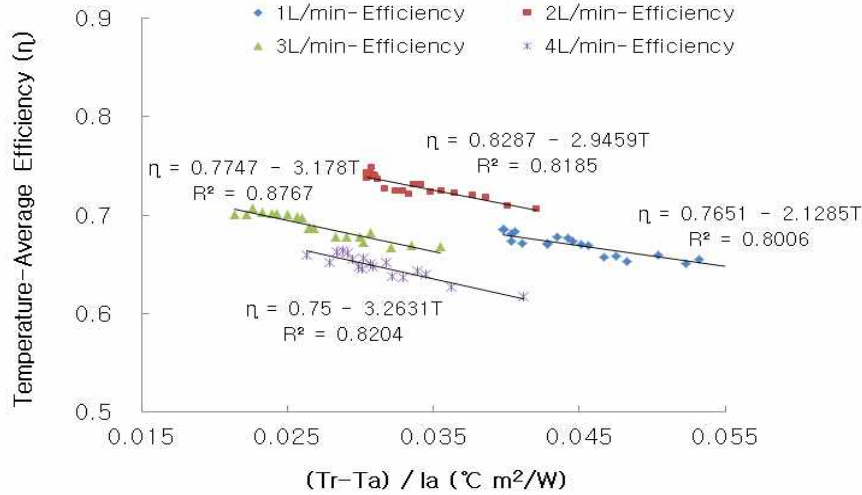
[그림 1-28] 집열시스템의 입구 온도에 따른 유량별 효율 비교 분석

[그림 1-29]에서와 같이 동일 유량에 대한 비교에서는 온도가 상승하면 효율이 감소하며, 2l/min의 감소폭이 가장 작고 4l/min의 감소폭이 가장 크다.



[그림 1-29] 집열시스템의 유량 변화에 따른 입구 온도별 효율 비교

[그림 1-30]의 $(T_r - T_a)/I_a$ 를 기준으로 한 효율분석에서도 최고 효율은 2l/min이며, 다음 3l/min, 1l/min, 4l/min 순으로 측정되었다. 효율 방정식에 대한 기울기는 1l/min에서 -2.1285로 가장 작게 나타났고 유량이 증가하면서 기울기도 증가하였다. 실험이 주로 10월중에 이루어 졌으나 유량 1l/min 경우 추가 실험으로 11월 중순에 이루어져 $(T_r - T_a)/I_a$ 값이 다른 유량보다 높으나 신재생에너지 설비심사 세부기준의 실외 열효율 시험 조건을 충족함으로 유량간 비교에는 문제가 없을 것이다.



[그림 1-30] 집열시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 따른 효율 비교 분석

[표 1-13]에는 집열시스템의 유량별 비교를 좀 더 쉽게 하기 위하여 표로 작성하였다.

[표 1-13] 집열시스템의 유량별 효율

유량		효율	효율 방정식	결정계수(R^2)
1l/min	시간 평균	66.4%	$\eta = 0.7372 - 1.5196T$	0.8892
	온도 평균	66.9%	$\eta = 0.7651 - 2.1285T$	0.8006
2l/min	시간 평균	72.8%	$\eta = 0.8241 - 2.8154T$	0.8201
	온도 평균	73.0%	$\eta = 0.8287 - 2.9459T$	0.8185
3l/min	시간 평균	69.2%	$\eta = 0.8586 - 5.5453T$	0.825
	온도 평균	68.8%	$\eta = 0.7747 - 3.178T$	0.8767
4l/min	시간 평균	64.6%	$\eta = 0.7737 - 3.9902T$	0.839
	온도 평균	64.8%	$\eta = 0.75 - 3.2631T$	0.8204

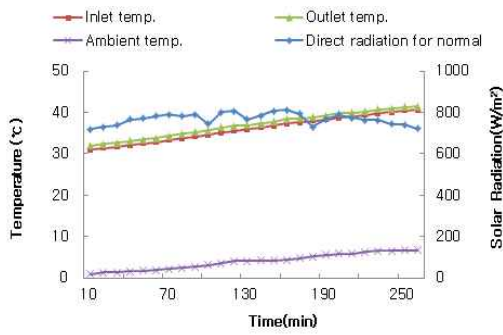
이와 같은 결과를 바탕으로 좀 더 세부적으로 분석해 보면 첫째, 대부분의 태양열 집열기에서는, 유량이 증가하면서 흡수율이 높아져 집열기 효율도 증가하지만 대류 열손실도 함께 증가하기 때문에 흡수율과 손실율의 경계점인 임계 유량이 존재하며, 본 시스템에서는 유량 2l/min 전후가 임계 유량임을 확인 할 수 있었다. 둘째, 모든 유량에 대해 열매체 온도가 증가하면서 효율이 감소하는 것은 대기온도와의 차이가 증가함으로 인해 대류 열손실도 함께 증가하여 효율이 감소하는 것으로 이런 현상은 일반적인 집열기의 기본 특성이며, 본 시스템도 같은 특성을 보여준다.

셋째, 유량이 증가함에 따라 효율 방정식의 기울기가 증가하였는데 이것은 열매체 온도가 상승할수록 높은 유량에서 손실이 더 크게 발생한다는 것을 의미한다. 그리고 1ℓ/min의 경우 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 동일한 구간에서 효율을 비교를 하기 위해 기울기의 연장선을 그어 비교해 보면 3ℓ/min 보다 효율이 높게 형성됨으로 기후 조건이 같은 상황에서 실험을 하면 3ℓ/min보다 1ℓ/min가 효율이 더 높아질 수 있다.

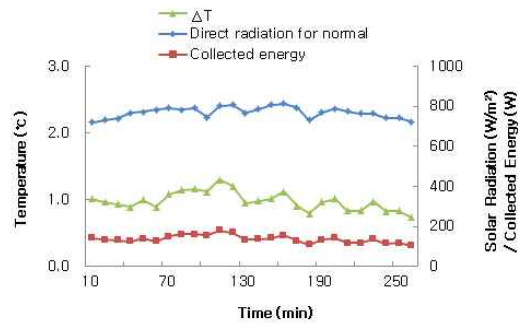
(4) 단열재와 바람막이를 제거한 후 실험한 결과에 대한 분석

흡수관을 둘러싸고 있는 아크릴 바람막이의 영향과 단열재의 영향을 확인하기 위해 아크릴과 단열재를 제거 한 후 유량 2ℓ/min에 대해 2012년 11월 20일 추가적인 실험을 실시하였다.

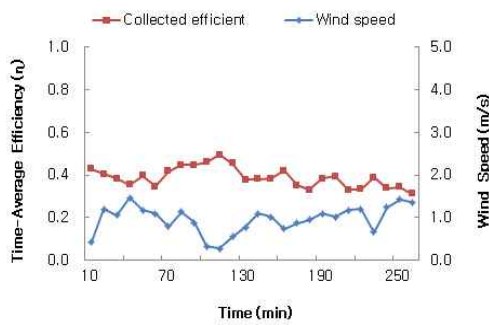
실험 결과 평균 효율은 38%로 본 실험의 73% 보다 35% 낮게 측정되었다. [그림 1-31] (a)~(c)의 그래프를 바탕으로 원인을 분석해 보면, 우선 외기온도가 본 실험을 할 때 보다 평균 12℃ 낮은 조건에서 실험이 이루어진 것이 효율 하락의 원인이며, [그림 1-31]의 (c)를 보면 효율이 풍속의 영향을 직접적으로 받는 것으로 보아 단열재와 아크릴 바람막이를 제거한 것이 직접적인 원인으로 보인다. 또한 [그림 1-31] (d)를 보면 효율 방정식의 기울기가 -9.7237로 본 실험의 효율 방정식 기울기 -2.8154 보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이것으로 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 증가하면서 효율 감소가 더 많음을 알 수 있다. 결정계수 R^2 이 0.3896로 효율도 불규칙함을 알 수 있는데 이 역시 바람의 직접적인 영향에 의한 것으로 판단된다.



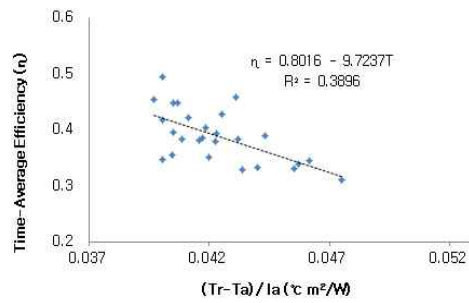
(a) 일사량 및 외기온도 변화와 입출구 온도 비교



(b) 일사량 변화와 입출구 온도차 및 축열 에너지 비교



(c) 풍량과 효율과의 관계



(d) 시간평균 효율

[그림 1-31] 단열재와 바람막이를 제거한 후 실험 결과

나. 복합시스템의 성능 실험 및 결과

(1) 복합시스템의 실험 방법 및 환경

실험은 집열시스템 성능실험과 동일한 조건에서 이루어 졌으며, 실험 기간이 길어지면서 외기온도가 낮아져 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 집열시스템과 비교하여 약 0.01 높은 환경에서 이루어졌다. 복합 시스템 시험 결과는 유량 3ℓ/min에서 최고 효율을 보임으로 3ℓ/min 실험에 대해서만 자세히 분석하고 나머지 유량에 대해서는 유량간 비교 분석만 하였다. [표 1-14]는 복합시스템의 유량별 실험 환경 조건이다.

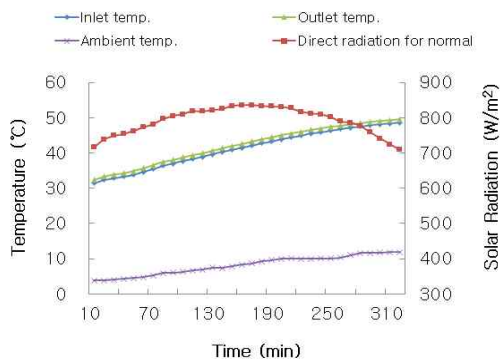
[표 1-14] 유량별 실험 환경 조건

유량	실험일시	입구온도(°C)	일사량(W/m ²) (최대/최소)	외기온도(°C)	풍량(m/s) (최대/최소/평균)
1ℓ/min	2012/11/03	30.0~49.8	828/705	3.9~11.8	1.32/0/0.68
2ℓ/min	2012/10/23	30.8~48.6	840/704	4.5~12.9	1.4/0.2/0.74
3ℓ/min	2012/11/02	31.5~49.4	835/708	3.8~12.3	1.43/0.17/0.69
4ℓ/min	2012/10/28	31.0~49.7	844/713	3.6~12.1	1.42/0.2/0.68

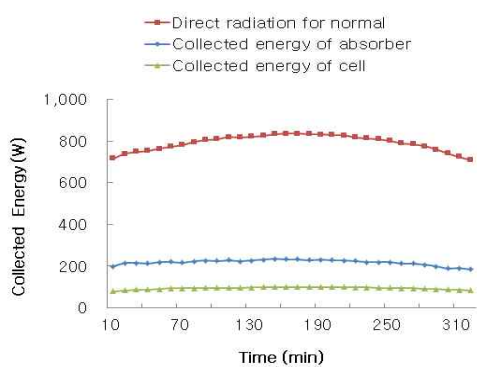
(2) 복합시스템의 측정 결과 분석

(가) 복합시스템 유량 3ℓ/min에 대한 10분 평균 집열 효율 분석

시간평균 효율분석 결과를 살펴보면 일사량 및 외기 온도는 [그림 1-32]와 같은 환경에서 실험이 이루어졌으며, [그림 1-33]은 일사량의 변화에 따른 셀의 발전량 그리고 흡수기의 집열 에너지를 비교한 그래프로 일사량의 증감에 따라 발전 및 집열 에너지도 유사하게 변화되고 있다.

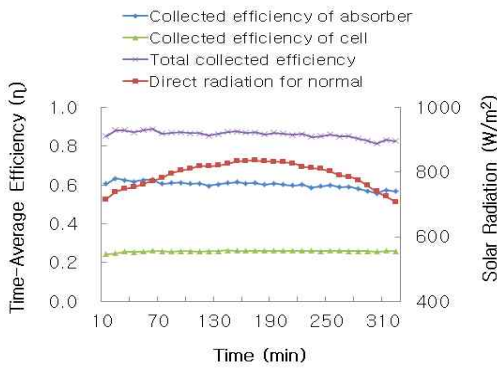


[그림 1-32] 복합시스템의 일사량, 외기온도, 입출구 온도 변화

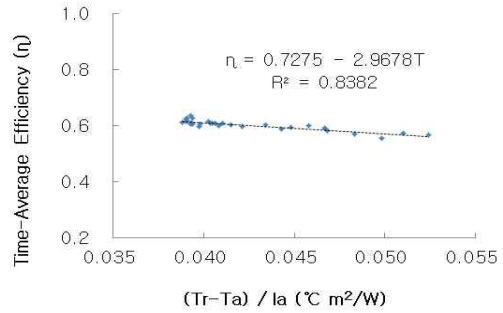


[그림 1-33] 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지

[그림 1-34]는 시간평균 효율 그래프로 시간 경과에 따라 일사량의 변화와 효율 변화를 비교하여 볼 수 있다. 일사량은 정오를 기점으로 증가하다가 감소하지만 셀 효율은 변화가 거의 없었으며, 집열 효율은 소폭 감소하는 경향을 보이는데 이것은 열매체 온도 상승에 따른 전압의 감소가 일사량의 증가에 따른 전류의 증가폭보다 더 컸기 때문이다. [그림 1-35]는 $(T_r - T_a)/I_a$ 증가에 따른 효율 변화를 보여주는 그래프로 효율 방정식은 $\eta = 0.7275 - 2.9678T$ 이고 결정계수 R^2 은 0.8382이다.

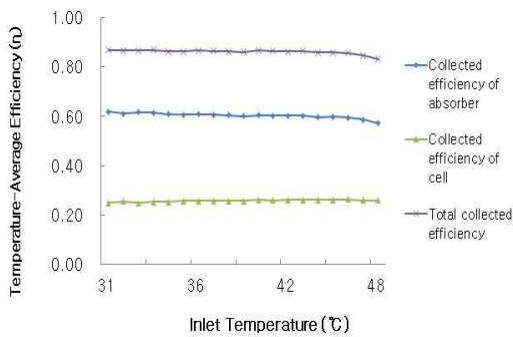


[그림 1-34] 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율 비교

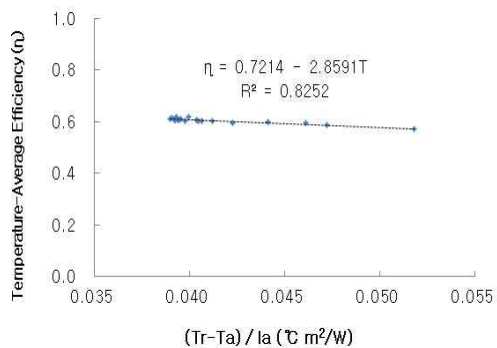


[그림 1-35] 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 흡수기 효율 변화율

[그림 1-36]과 [그림 1-37]은 온도평균으로 산출한 효율 특성 그래프로 열매체 온도에 따른 효율로 셀 효율은 입구 온도에 따른 변화가 거의 없었으며, 집열 효율은 열매체 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. [그림 1-37]은 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 증가에 따라 온도평균 효율이 감소하는 경향을 보여주고 있다.



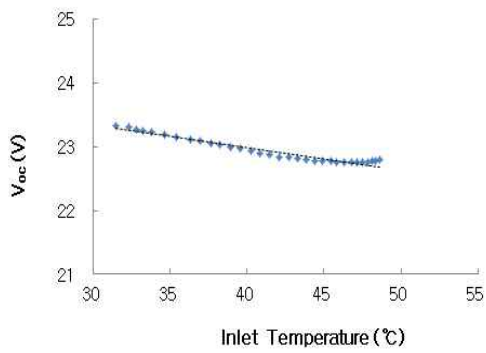
[그림 1-36] 복합시스템의 입구 온도에 따른 온도 평균 효율 변화



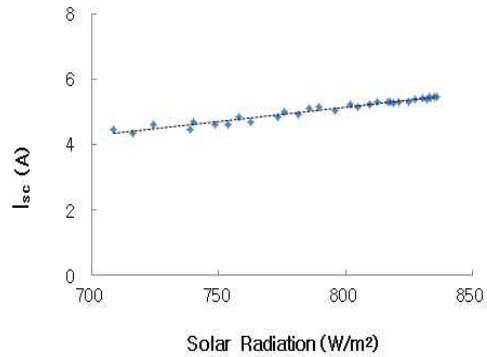
[그림 1-37] 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 온도평균 흡수효율 변화율

(나) 복합시스템의 발전 효율 분석

유량 3ℓ/min에 대한 실험에서 집열 효율도 가장 높게 측정되었지만 셀 효율도 가장 높게 측정되었다. [그림 1-38]과 [그림 1-39]는 유량 3ℓ/min에서 5분 간격으로 측정된 개방전압과(V_{oc})과 단락전류(I_{sc})를 10분 간격으로 평균하여 열매체 입구 온도에 따른 변화를 보여주는 그래프이다. 일반적으로 셀의 온도가 높아지면 전압이 감소하고 일사량이 증가하면 전류가 증가하는데 본 시스템에서도 같은 특징을 보여주고 있다.

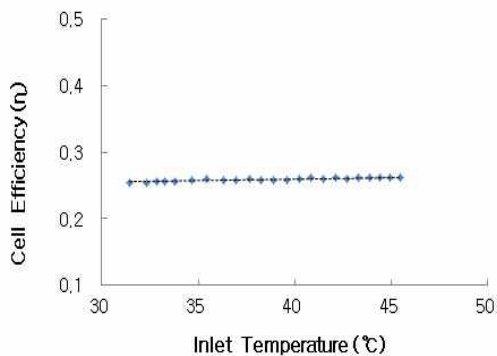


[그림 1-38] 복합시스템의 입구 온도에 따른 개방전압의 변화율

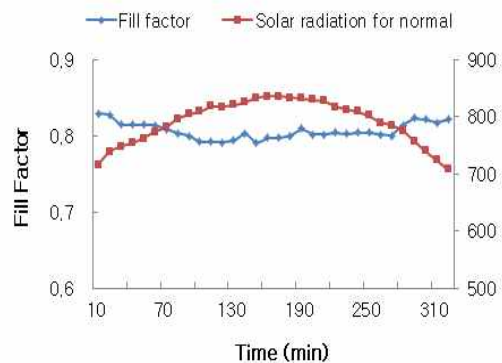


[그림 1-39] 복합시스템의 일사량 변화에 따른 단락전류의 변화율

[그림 1-40]은 열매체 온도 증가에 따른 효율 변화를 나타내는 그래프로 일반적으로 열매체 온도가 증가하면 셀의 온도가 상승하고 효율이 감소하는데 본 시스템은 효율 변화가 거의 없는 것으로 측정되었다. 이것은 열매체 온도와 함께 일사량도 변함으로써 두 가지 요소가 복합적으로 작용하여 변화가 없는 것으로 보인다. [그림 1-41]은 일사량 변화에 따른 충전율(Fill Factor)의 변화를 나타낸 그래프로 일사량과 충전율은 반비례함을 보여준다.

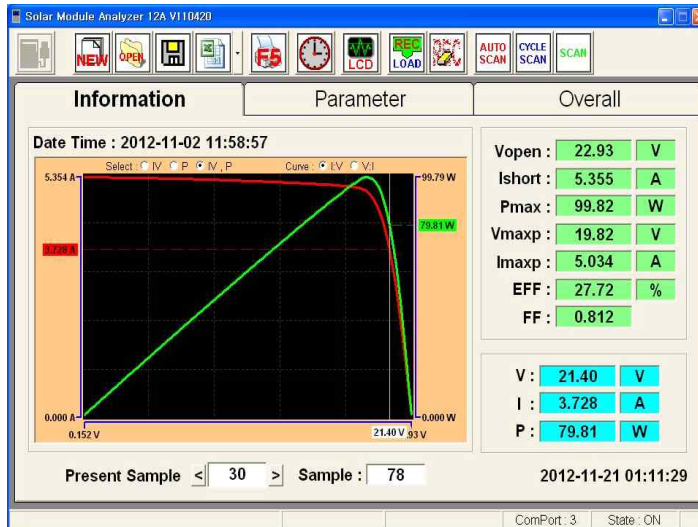


[그림 1-40] 입구 온도에 따른 셀 효율 변화율



[그림 1-41] 일사량과 충전율의 비교

[그림 1-42]는 최고 출력을 나타낸 시각에 solar module analyzer로 측정된 전압 전류(V-I) 곡선으로 개방전압 22.93V에 최대전압(V_{mp}) 19.82V, 단락전류 5.355A에 최대전류(I_{mp}) 5.034A이고 충전율이 0.812로 양호한 출력 특성을 보여주고 있다. [그림 1-42]의 I-V 커브에 표시되는 효율(EFF)은 평균일사량 값을 입력하여 산출한 효율로 실제 해당 시간의 법선면 직달일사량을 사용하여 계산한 효율은 26.1%이다.

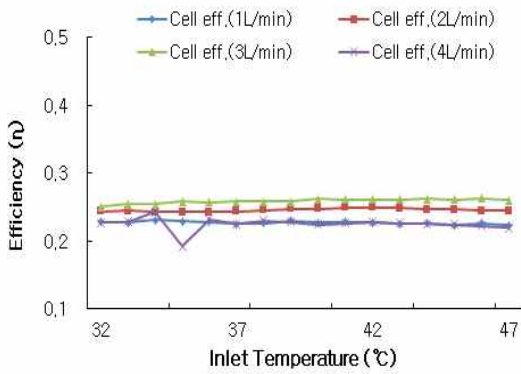


[그림 1-42] 복합시스템의 voltage-current curve

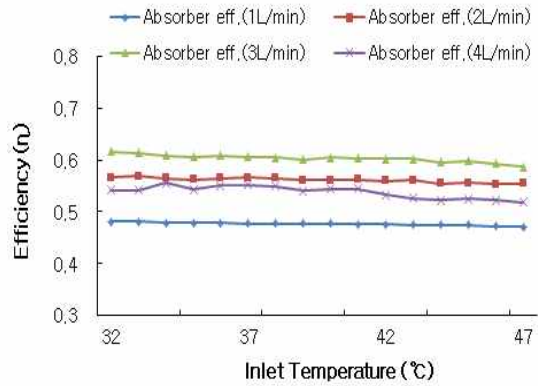
(3) 복합시스템의 유량별 집열 효율 및 발전 효율 비교 분석

(가) 복합시스템의 온도 기준 유량별 효율 비교

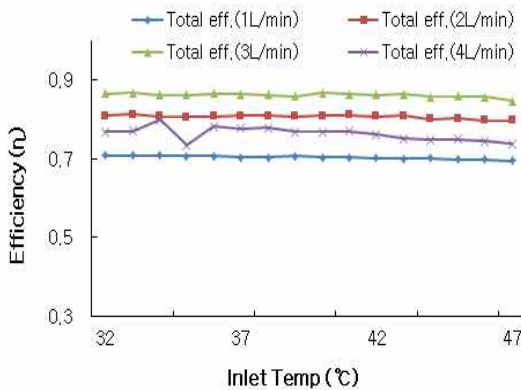
복합시스템의 성능을 집열 효율과 발전 효율로 구분하여 입구 온도 평균으로 분석해 보면 다음과 같다. [그림 1-43]의 (a)는 셀 효율로 3l/min가 최고 효율을 보였으며 다음으로 2l/min 그리고 1l와 4l가 비슷한 효율을 보였다. [그림 1-43]의 (b)는 집열 효율로 역시 3l가 최고 효율을 보였으며 2l/min, 4l/min, 1l/min 순으로 측정되었고 [그림 1-43]의 (c)에서와 같이 합산 효율도 3l/min, 2l/min, 4l/min, 1l/min 순으로 분석 되었다. 4l/min의 경우 35°C 구간에서 구름의 영향으로 셀 효율은 급격히 떨어지고 집열 효율은 증가한 부분이 있으며 합산 효율도 셀 변환효율의 감소폭이 크기 때문에 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다.



(a) 유량별 셀 효율 비교



(b) 유량별 흡수 효율 비교

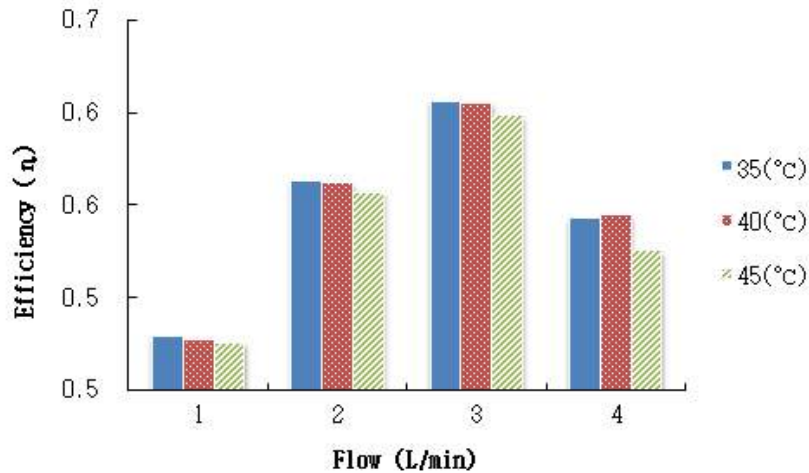


(c) 유량별 합산 효율 비교

[그림 1-43] 복합시스템의 온도에 따른 유량별 효율 비교 분석

(나) 복합시스템의 유량 변화에 따른 온도별 집열 효율 비교

[그림 1-44]는 유량 변화에 따른 35°C, 40°C, 45°C 구간의 효율 그래프이다. 4 l/min에서 35°C와 40°C 구간의 효율만 비슷하게 측정되었고 나머지 전 구간에 대해 온도가 상승하면서 효율이 하락하는 것을 알 수 있다. 4l/min가 35°C와 40°C 효율이 비슷한 것은 위 [그림 1-43]에서 보는 바와 같이 구름의 영향으로 35°C 효율이 급격하게 하락한 것이 원인이다.

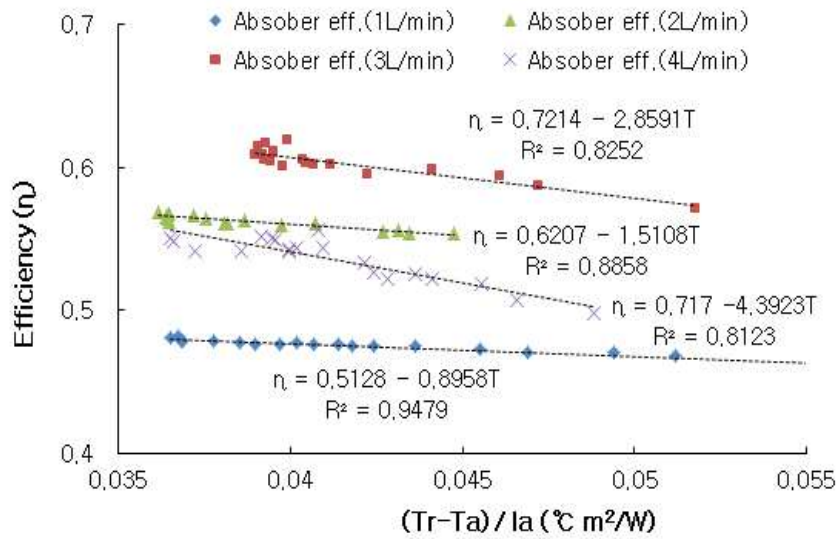


[그림 1-44] 복합시스템의 유량 변화에 따른 온도별 흡수 효율 비교 분석

(다) 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 기준 유량별 집열 효율 비교

[그림 1-45]는 열매체 입구 온도 평균 효율을 $(T_r - T_a)/I_a$ 기준으로 표현한 것이다. 효율은 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 동일한 구간인 0.04 전후를 비교해 보면 3ℓ/min가 가장 높고 2ℓ/min, 4ℓ/min, 1ℓ/min 순서로 분석되었다. 전 유량에 걸쳐 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 증가하면서 효율이 감소하였으며 유량이 클수록 효율 방정식의 기울기가 증가하였다. 절편은 4ℓ/min, 3ℓ/min, 2ℓ/min, 1ℓ/min 순으로 측정되었다.

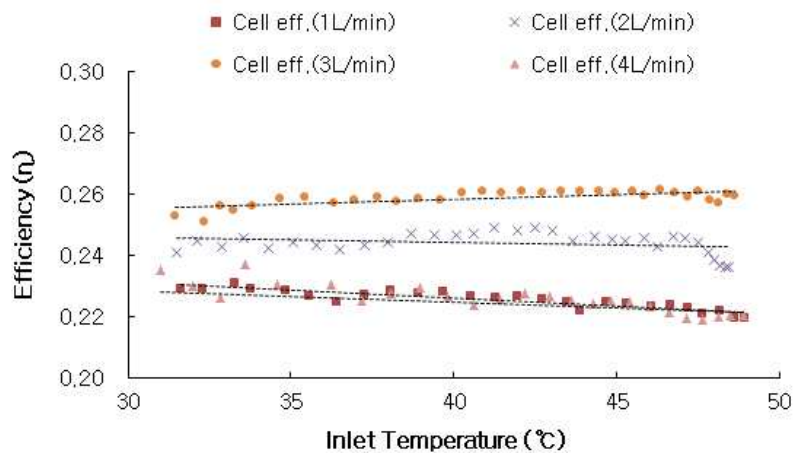
이 결과를 토대로 유량 3ℓ/min 전후한 구간에서 임계 유량이 존재함을 알 수 있다. 또한 유량 4ℓ의 경우 기울기가 -4.3923, 절편이 0.717로 $(T_r - T_a)/I_a$ 의 값이 0인 환경($T_r = T_a$)에서 사용하면 71.7%의 효율을 나타낼 수 있으나 반대로 열매체 온도와 외기온도의 차이가 큰 환경에서 사용하면 손실이 가장 클 수도 있다.



[그림 1-45] 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 에 따른 유량별 효율 비교

(라) 복합시스템의 유량별 발전 효율 비교 분석

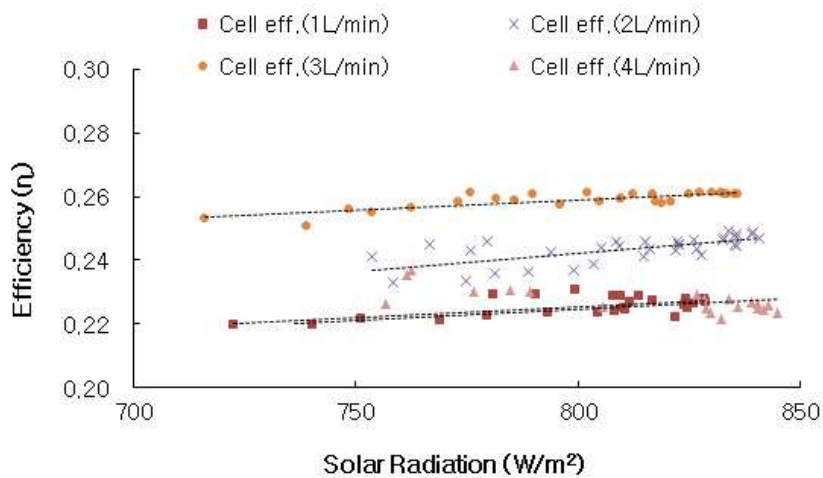
[그림 1-46]은 입구온도에 따른 유량별 발전 효율을 보여주고 있다. 유량 3l/min에서 최고 효율을 나타냈으며 다음은 2l/min이고 1l/min와 4l/min가 22.5%, 22.4%로 비슷한 효율을 나타내었다. 열매체 온도가 증가하면서 유량별로 효율이 일정하거나 소폭 하락하는 경향을 보이는데 이것은 셀의 온도가 상승하면 출력이 감소하는 것은 CPV 셀의 일반적인 특징이다.



[그림 1-46] 복합시스템의 입구온도에 따른 유량별 셀 효율

일사량을 기준으로 한 [그림 1-47]의 그래프에서는 일사량 증가에 따른 효율이 소폭 증가하는 추세를 보인다. 일반적으로 일사량이 증가하면 전류가 증가하고 셀의 온도가 상승하면 전압이 하락하는 경향을 보이는데 본 실험에서는 일사량이 오

전을 기점으로 상승 후 하락하고, 열매체 온도는 일정하게 상승하는 상황에서 실험이 이루어져 출력의 상승요인과 하락 요인이 함께 변함으로 일사량이나 열매체 온도 변화에 따른 효율 변화를 파악하기 어렵고 또한 효율 변화폭이 $\pm 1\%$ 이내로 효율 변화에 대한 결론을 내리기는 어려움으로 이 결과는 유량에 따른 효율 차이만을 확인하는 용도로 활용하였다.



[그림 1-47] 복합시스템의 일사량에 따른 유량별 셀 효율

(마) 집열 효율과 발전 효율의 관계

복합시스템에 집열 효율과 발전 효율이 높은 순으로 보면 3l/min, 2l/min 순으로 동일하고, 집열 효율에서는 세 번째가 4l/min이고 네 번째가 1l/min 순이고, 발전 효율에서는 4l/min,와 1l/min가 비슷하게 측정되었는데, 이것은 집열 효율이 높은 유량에서 집광영역의 온도가 낮게 형성되기 때문에 유량에 따른 집열 효율과 발전 효율이 순서가 비슷하다. [표 4-4]은 유량별 효율을 정리한 것이다.

[표 1-15] 복합시스템의 유량별 효율 측정값

유량	흡수 효율	셀 효율	합산 효율
1L/min	47.7%	22.7%	70.4%
2L/min	56.2%	24.5%	80.7%
3L/min	60.3%	25.9%	86.2%
4L/min	53.8%	22.5%	76.3%

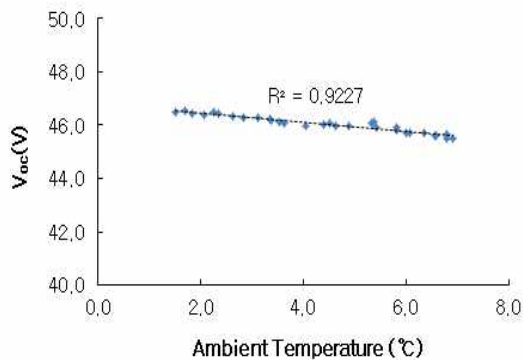
다. CPV 모듈 성능 실험 및 결과

(1) CPV 모듈의 실험 환경

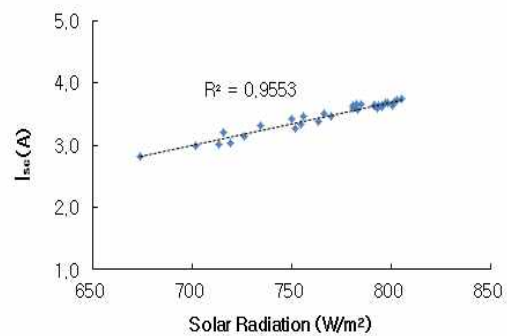
CPV 모듈에 대한 실험은 2012년 11월 14일 09시부터 16시 사이에 이루어 졌으며 외기 온도는 1°C~7°C, 풍속은 0~4.5m/s, 일사량은 법선면직달일사량 기준 701~805 W/m² 범위에서 이루어졌다.

(2) CPV 모듈에 대한 측정 결과 및 분석

CPV 모듈에 대한 실험에서 [그림 1-48]은 외기온도 변화에 따른 개방전압의 변화로, 외기 온도가 증가하면서 셀의 방열 성능이 떨어져 셀의 온도가 상승하고 개방전압이 감소되는 변화를 잘 보여주고 있으며, [그림 1-49]는 일사량의 증가에 따른 단락전류의 증가량을 보여주고 있다.

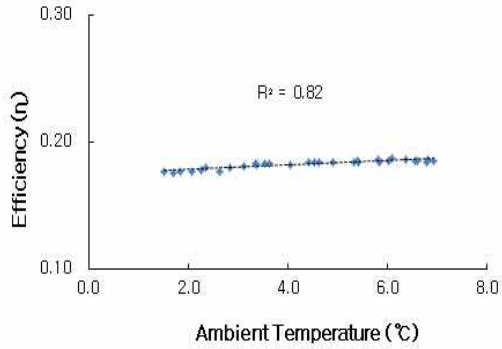


[그림 1-48] CPV 모듈의 외기온도에 따른 개방전압의 변화율

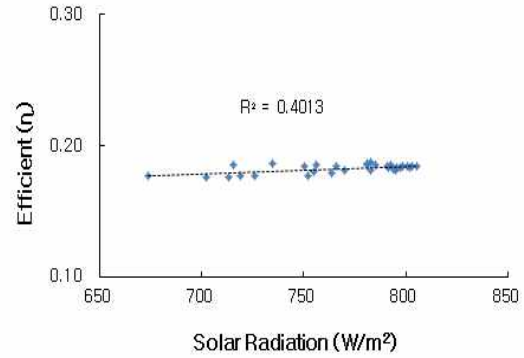


[그림 1-49] CPV 모듈의 일사량에 따른 단락전류의 변화율

[그림 1-50]에서는 외기온도에 따른 효율 변화를 표시한 그래프로 외기 온도가 상승하면서 효율이 약간 상승하였다. [그림 1-51]은 일사량의 변화에 따른 효율 변화 그래프로 R²이 0.4013으로 일사량 변화와 효율 변화의 상관관계를 파악하기는 어려우며, 일반적으로 일사량 증가는 전류 출력을 증가시키고, 외기온도의 상승은 전압 출력을 감소시킴으로 두 변수가 복합적으로 작용하여 효율이 결정되나, 본 실험은 야외에서 이루어진 관계로 어느 하나의 변수를 인위적으로 조절 할 수 없어 실험 결과는 복합시스템과의 비교 자료로만 사용하였다.

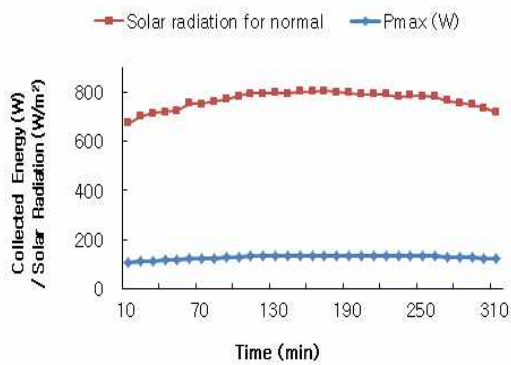


[그림 1-50] CPV 모듈의 외기 온도에 따른 셀 효율 변화율

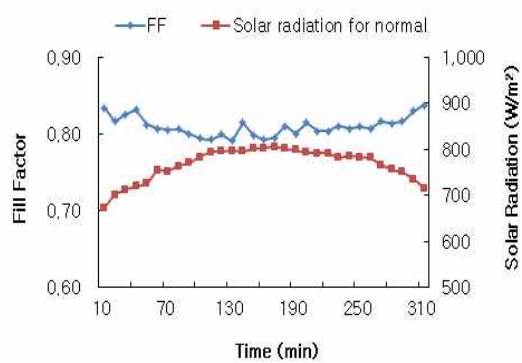


[그림 1-51] CPV 모듈의 일사량에 따른 셀 효율 변화율

[그림 1-52]은 일사량의 변화와 셀의 전력 발생량을 비교하는 그래프로 일사량의 증감에 따라 발전량도 증감되는 것을 보여주고 있으며, [그림 1-53]은 일사량의 증감에 따라 충전율은 반대로 감소되었다 증가하는 변화 상태를 보여주고 있다.

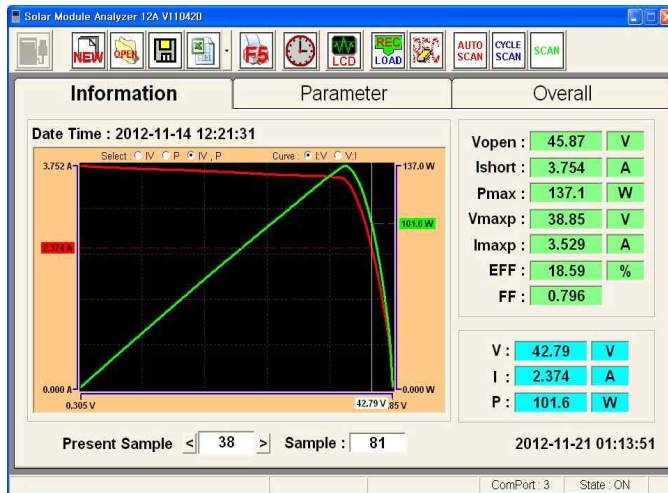


[그림 1-52] CPV 모듈의 일사량과 셀 출력 비교



[그림 1-53] CPV 모듈의 일사량과 충전율 비교

[그림 1-54]는 최고 출력을 나타낼 때의 전압-전류-전력 그래프로 개방전압 45.87V에 최대전압 38.85V, 단락전류 3.754A에 최대전류 3.529A로 최대 출력은 137.1W, 충전율은 0.796으로 측정되었다.



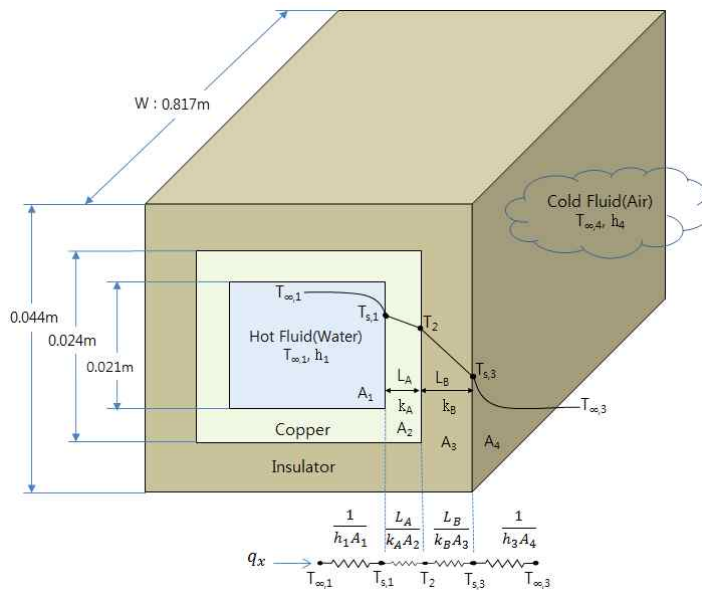
[그림 1-54] CPV 모듈의 I-V curve

위 결과를 종합해 보면 CPV 모듈의 최대 효율은 18.7%, 최소 효율은 17.6%를 기록했으며 평균 효율은 18.2% 충전율 평균은 0.8로 비교적 안정적인 출력을 보이고 있다.

라. CFD 해석

(1) 해석을 위한 열전달 계수의 산출

해석을 위해 [그림 1-55]와 같이 복합벽에 대한 등가회로로 모델을 단순화하고 해석 영역의 경계에 대한 전도열전달계수(k_B)와 대류열전달계수(h_3)을 산출하였다.



[그림 1-55] 해석 영역에 대한 열전달 등가 회로

[그림 1-55]에서 열매체와 흡수관 내부 벽면 사이 그리고 단열재와 외부 공기와의 접촉면 사이에서는 대류열전달이 발생하고, 흡수관과 단열재는 두께 방향으로는 전도열전달이 발생한다. 이와 같은 복합벽에 대한 1차 열전달률은 식[1-27]로 표현할 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{\Sigma R_t} \quad [1-27]$$

여기서 $T_{\infty,1} - T_{\infty,3}$ 은 총합 온도차이며 총합 ΣR_t 는 모든 열저항을 포함한다. 따라서 q_x 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{[(1/h_1A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (1/h_3A)]} \quad [1-28]$$

위 식을 각 요소별 등가 열회로(equivalent thermal circuit)로 표현 하면 식[1-29]와 같다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{(1/h_1A)} = \frac{T_{s,1} - T_2}{(L_A/k_A A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/k_B A)} = \frac{T_{s,3} - T_{\infty,3}}{(1/h_3A)} \quad [1-29]$$

이 식은 Newton의 냉각법칙과 유사한 형식으로 표현하면 식[1-30]과 같이 쓸 수 있다.

$$q_x = UA \Delta T \quad [1-30]$$

여기서 U 는 총합열전달계수(overall heat transfer coefficient)로 복합벽에 대한 해석에 사용되며 ΔT 는 총합 온도차이다. 식[1-27]과 식[1-28]로부터 $UA = 1/R_{tot}$ 으로 표현 될 수 있고 총합열전달계수로 표현하면 식[1-31]와 같으며, 일반적인 방법으로 표현하면 식[1-32]와 같다.

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (1/h_3)]} \quad [1-31]$$

$$R_{tot} = \Sigma R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad [1-32]$$

본 해석 모델의 면적 A 는 내부에서 외부로 갈수록 증가함으로 각각의 면적을 A_1, A_2, A_3, A_4 라 가정하면 식[1-28]은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{[(1/h_1 A_1) + (L_A/k_A A_2) + (L_B/k_B A_3) + (1/h_3 A_4)]} \quad [1-33]$$

식[1-26]을 총합열전달계수 U 항으로 표현하면 식[1-34]와 같이 되고

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{R_{tot}} = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,3}) \quad [1-34]$$

U 를 안쪽면적 A_1 항으로 정의하면 식[1-35]와 같이 된다.

$$U_1 = \frac{1}{(1/h_1) + A_1(L_A/k_A A_2) + A_1(L_B/k_B A_3) + A_1(1/h_3 A_4)} \quad [1-35]$$

이러한 방법으로 U_2, U_3, U_4 를 구할 수 있으며 총합열전달계수와 면적의 항으로 정리하면 $U_1 A_1 = U_2 A_2 = U_3 A_3 = U_4 A_4 = (\Sigma R_t)^{-1}$ 로 표현된다.

본 해석에서는 입구와 셀 영역에 투입된 열량의 합과 출구에서의 열량의 차이가 흡수관 주변으로 손실된 열량임으로 $q_x = q_{inlet} + q_{cpv} - q_{outlet}$ 식으로부터 q_x 를 구하고, 실험으로부터 측정된 열매체 온도와 외기온도를 식4-4에 적용하여 총괄열전달계수 U 를 구하였다. 총괄열전달계수 U 를 구하기 위해 사용한 면적 A 의 가로 길이는 흡수관과 연결 호스를 펼친 길이를 사용했고 세로 길이는 안쪽 길이와 바깥쪽 길이의 평균값을 사용하였다.

총괄열전달계수를 구한 후 식[1-30]과 Newton의 냉각법칙 공식인 식[1-36]를 등가로 놓고 단열재 표면에서의 대류열전달계수(h_3)를 구한 다음 식[1-36]과 Fourier의 법칙 공식인 식[1-37]을 등가로 놓고 단열재의 전도열전달계수(k_B)를 구하였다. 단열재의 전도열전달계수(k_B)를 구함에 있어 연결 호스 부분은 원형관으로 식[1-38]을 적용하였다.

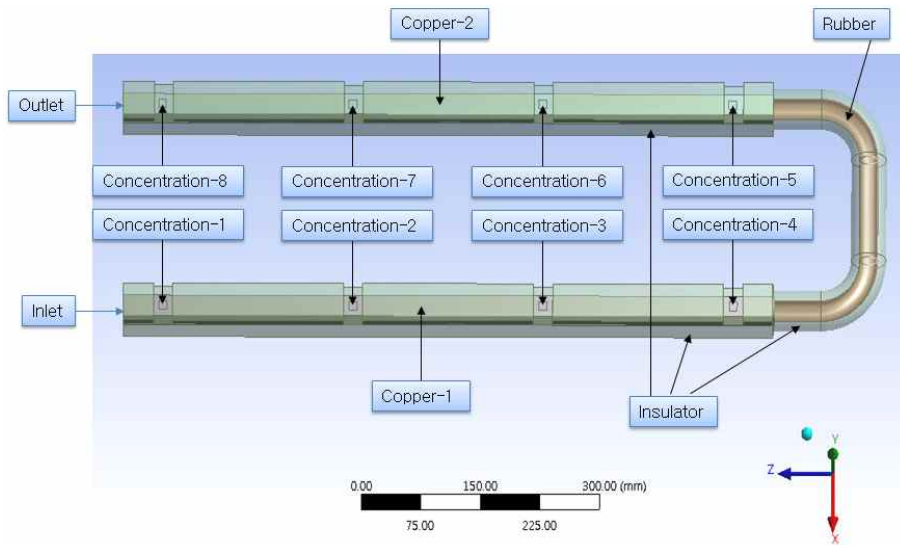
$$q'' = h_3 A_4 (T_{\infty} - T_{s,3}) \quad [1-36]$$

$$q_x = k_B A_3 \frac{(T_2 - T_{s,3})}{L} \quad [1-37]$$

$$q_r = \frac{2\pi L k_B (T_2 - T_{s,3})}{\ln(r_2/r_1)} \quad [1-38]$$

(2) 물성값 및 경계조건 설정

해석영역에 대한 재료의 구성과 경계영역에 대한 명칭을 [그림 1-56]에 표시하였다. 단열재는 전체를 하나의 형상(feature)로 구성하였고 흡수관 동파이프는 Copper-1과 Copper-2로 나누어 설정하였으며 집광영역은 각각 Concentration-1부터 Concentration-8까지 영역 명칭을 부여하였다.



[그림 1-56] 모델 구조와 해석 영역

해석에 적용할 재료의 물성값과 경계조건은 [표 1-16] 및 [표 1-17]과 같다.

[표 1-16] Cell zone condition

Material	Density(kg/m ³)	Cp(Specific heat)(J/kg · K)	Thermal conductivity(W/m · K)	Remark
Water Liquid	991	4179	0.634	Reference
Air	1.225	1006.43	0.0242	Default
Copper	8978	381	387.6	“
Insulator	40	1210	0.39	Measurement
Rubber	1100	2010	0.13	Reference

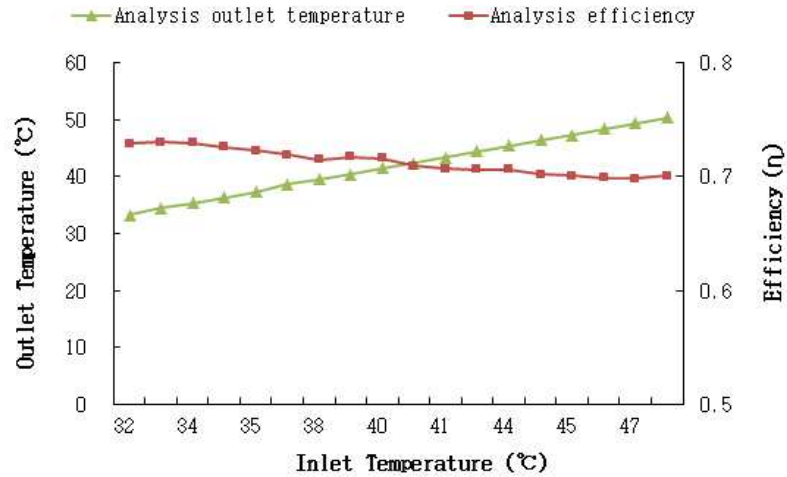
[표 1-17] Boundary Condition

Zone name	Type	Boundary condition	Remark
Inlet	Velocity inlet	- 유속 : 유량/단면적 - 입구온도 : 측정값	
Outlet	Pressure outlet	- 기본값 사용	
Concentration-1 ~ Concentration-8	Wall	- Heat transfer coefficient : $20.03\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ - Free stream temperature : 측정값 - External emissivity : 0.94 - External radiation temperature : 측정값 - Heat generation rate : 일사량*렌즈면적	* 단 열 재 표면에서 대류 열전달계수 사용
Insulator	Wall	- Heat transfer coefficient : $20.03\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ - Free stream temperature : 측정값	“
Copper-1 ~ Copper-2	Wall	- Heat transfer coefficient : $20.03\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ - Free stream temperature : 측정값 - External emissivity : 0.94 - External radiation temperature : 측정값	“

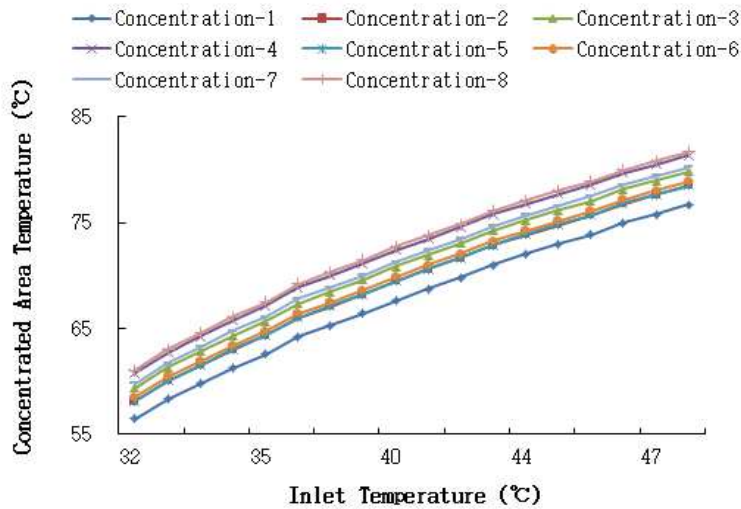
(3) CFD 해석 결과

CFD 해석은 가장 효율이 좋은 집열시스템의 $2\ell/\text{min}$ 과 복합시스템의 $3\ell/\text{min}$ 에 대해서만 진행하였다. 해석 방법은 실험에서 측정한 입구온도와 유량, 흡수관 주변온도를 경계조건으로 사용하여 해석 한 후 출구 온도를 산출하였다.

[그림 1-57]은 해석으로 얻은 출구 온도분포이고 [그림 1-58]은 집광영역의 표면 평균온도 분포이다. 입구 온도에 따라 출구 온도는 비례하여 상승함을 알 수 있고 효율은 소폭 하강함을 알 수 있다. [그림 1-58]에서 온도 분포를 전체적으로 보면 입구 온도가 상승하면서 셀의 온도가 상승하지만 그 증가세가 서서히 둔화됨을 알 수 있다.

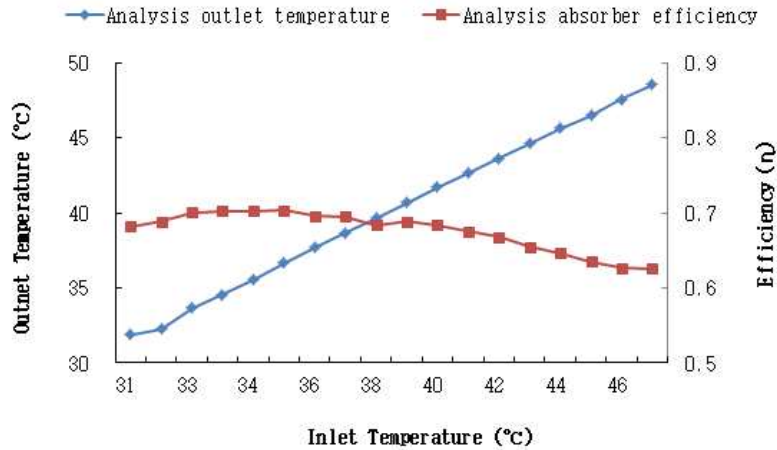


[그림 1-57] CFD 해석을 통한 출구 온도 및 효율(집열시스템의 유량 2ℓ/min 실험 변수를 이용한 해석)

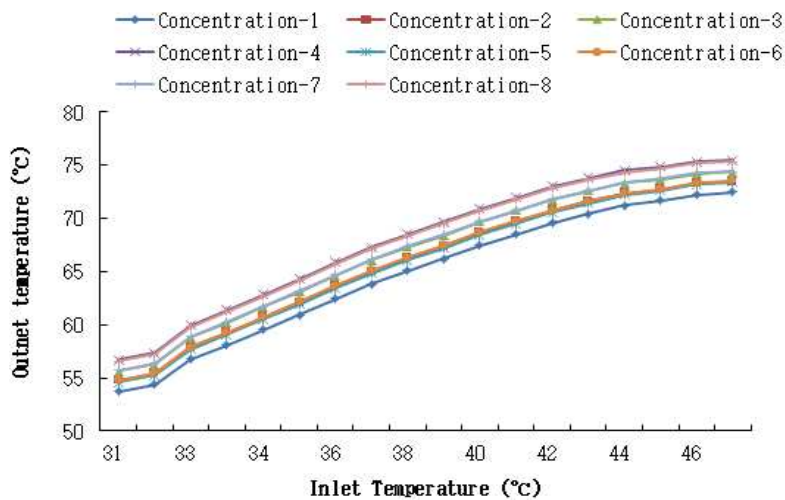


[그림 1-58] CFD 해석을 통한 집광영역 온도 분포(집열시스템 유량 2ℓ/min 실험 변수를 이용한 해석)

[그림 1-59]는 복합시스템 유량 3ℓ/min 실험의 측정 결과를 이용하여 출구 온도를 해석한 결과로 CPV 셀을 부착하였음에도 입구온도의 증가에 따른 출구온도의 증가와 효율 감소 변화는 집열시스템의 출력과 유사한 형태를 보이고 있다. 집광 영역의 온도 증가율도 유사한 형태를 보이고 있다.



[그림 1-59] CFD 해석을 통한 출구 온도 및 효율(복합시스템의 유량 3ℓ/min 실험 변수를 이용한 해석)

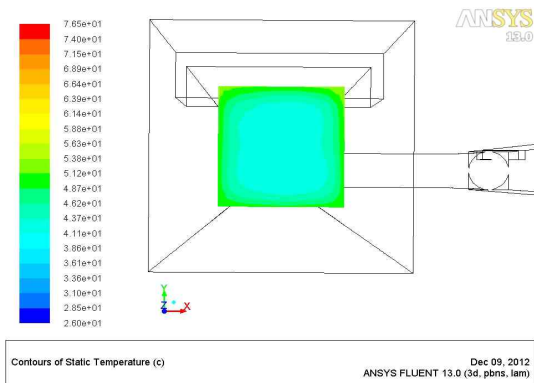


[그림 1-60] CFD 해석을 통한 집광영역 온도 분포(복합시스템 유량 3ℓ/min 실험 변수를 이용한 해석)

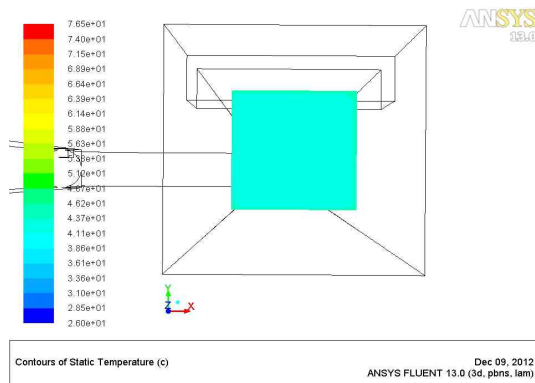
(4) CFD 해석 단면의 온도 및 속도 분포

집열시스템의 유량 2ℓ/min 중 입구온도 40.47°C에 대하여 해석 한 후 해석 단면에 대한 온도 및 속도 분포를 [그림 1-61] ~ [그림 1-62]에 나타내었다. 입구 경계 조건으로 유량 2ℓ/min에 대한 환산 유속 0.0756m/s와 입구온도 40,47°C를 주었으며, 흡수관 주변온도는 측정된 값인 20.4°C를 입력하였다. Concentration 영역에 대한 heat generation rate는 일사량 847W/m²에 대해 단위체적으로 환산하여 484,186,000W/m³으로 주었다.

[그림 1-61]과 [그림 1-62]는 입구와 출구 단면의 온도 분포로 입구 단면의 유체 온도는 경계조건으로 입력한 40.47℃의 분포를 보이나 출구 온도는 동파이프 주변으로 좀 더 높은 온도 분포가 형성되었다.

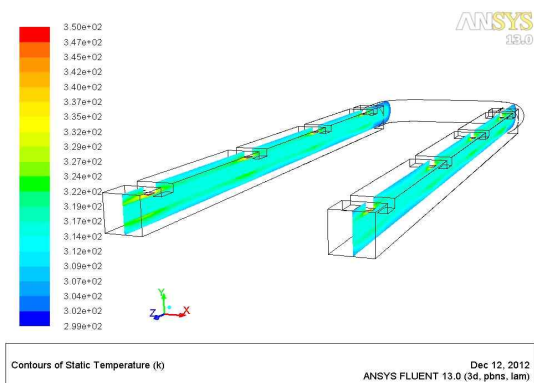


[그림 1-61] 출구 단면의 온도 분포

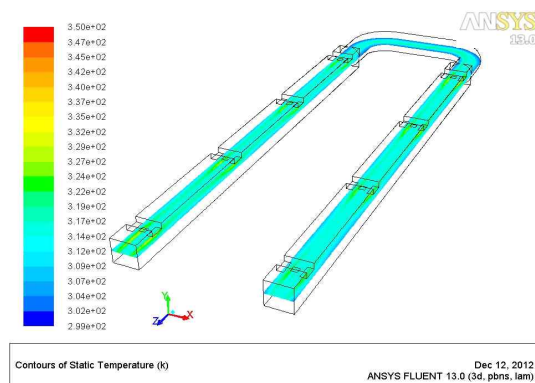


[그림 1-62] 입구 단면의 온도 분포

[그림 1-63]과 [그림 1-64]는 유체의 흐름 방향으로 수직단면과 수평단면에서 온도분포이다. Concentration-1에서 Concentration-8 영역 부근에서 높은 온도 분포가 형성되어 있음을 알 수 있고, 입구보다는 출구 영역에서 좀 더 높은 온도 분포가 형성되었다.



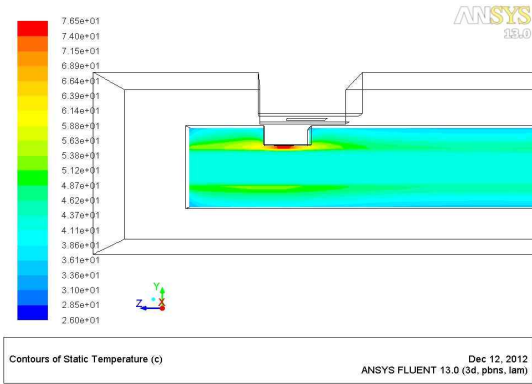
[그림 1-63] 흐름방향 수직 단면의 온도 분포



[그림 1-64] 흐름방향 수평 단면의 온도 분포

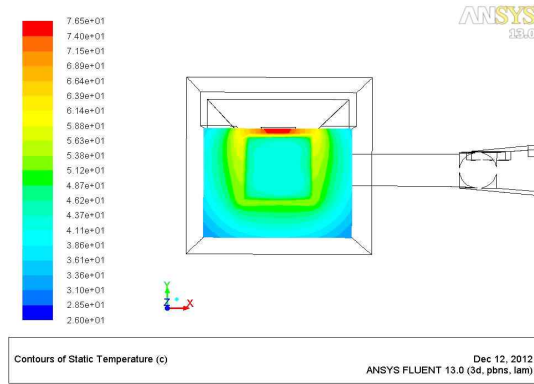
[그림 1-65]는 출구 부근 흐름방향 수직 횡단면 온도 분포로 Concentration-8 집광 영역의 열이 동파이프 윗면과 아래면에서 열매체와 단열재로 전달되는 형상을

확인 할 수 있으며, 열매체의 흐름에 따라 출구 방향으로 고온 영역이 더 넓게 분포함을 알 수 있다. [그림 1-66]은 Concentration-8 영역의 수직 종단면 온도 분포로 열전도계수가 높은 동파이프 통하여 측면과 바닥부분까지 열이 전달되는 형상을 확인 할 수 있다.



Contours of Static Temperature (c) Dec 12, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbrns, lam)

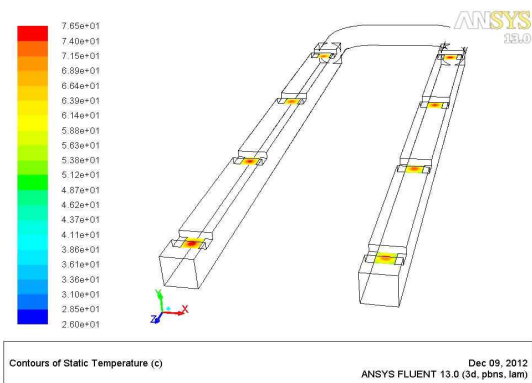
[그림 1-65] 출구 부근 흐름방향 수직 횡단면 온도 분포



Contours of Static Temperature (c) Dec 12, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbrns, lam)

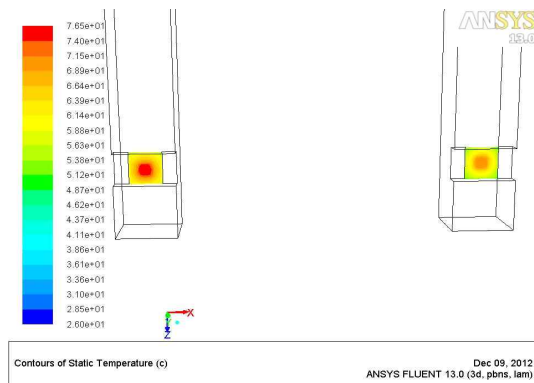
[그림 1-66] 출구 단면 50mm 앞 위치의 수직 종단면 온도 분포

[그림 1-67]은 사각 동파이프 상단의 열 분포로 집광 영역을 중심으로 고온의 열이 동파이프를 통하여 전달되는 형상을 보여주고 있으며, [그림 1-68]은 입구와 출구 부근 집광영역의 온도 분포로 출구 부근의 집광영역이 입구부근 집광영역보다 높은 온도가 형성됨을 알 수 있다. [그림 1-69]와 [그림 1-70]은 집광영역의 온도 분포를 plotting 한 것으로 흐름 방향을 따라 온도가 점차 상승함을 알 수 있다. 입구 부근인 Concentration-1 영역의 평균 온도는 68.7℃이고 출구 부근인 Concentration-8 영역의 평균 온도는 73.8℃이다.



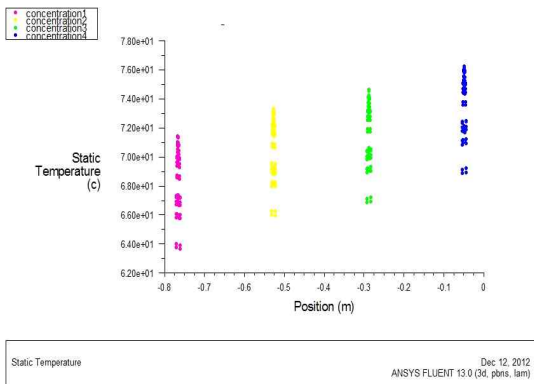
Contours of Static Temperature (c) Dec 09, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbrns, lam)

[그림 1-67] 동파이프 상단면 온도 분포

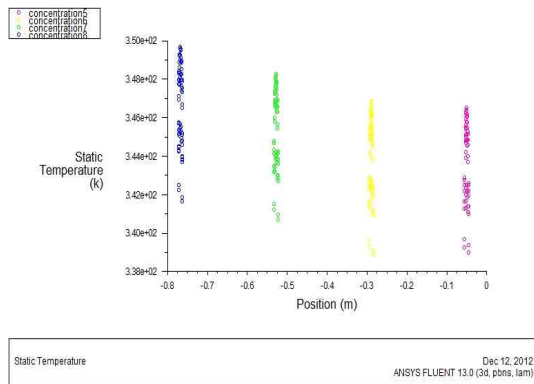


Contours of Static Temperature (c) Dec 09, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbrns, lam)

[그림 1-68] 입구와 출구 부근 집광 영역의 온도 분포

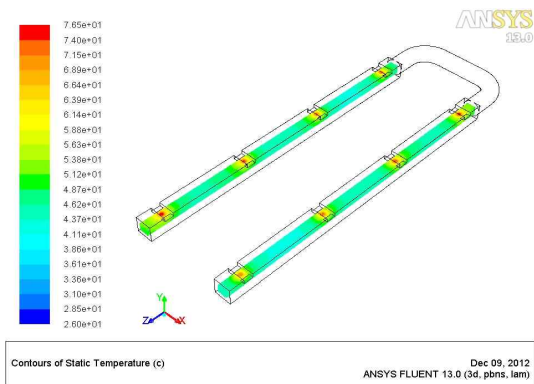


[그림 1-69] Concentration-1 ~ Concentration-4 위치의 온도분포

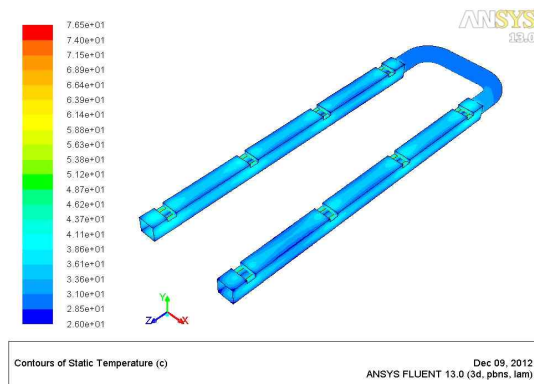


[그림 1-70] Concentration-8 ~ Concentration-5 위치의 온도분포

[그림 1-71]은 흡수관인 사각 통과이프의 온도분포이고 [그림 1-72]는 단열재 표면의 온도 분포이다. 두 그림을 통하여 흡수관과 단열재의 온도 차이를 확인 할 수 있다.

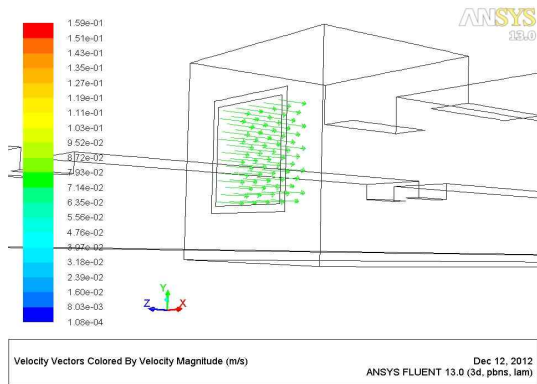


[그림 1-71] 흡수관 표면의 온도 분포

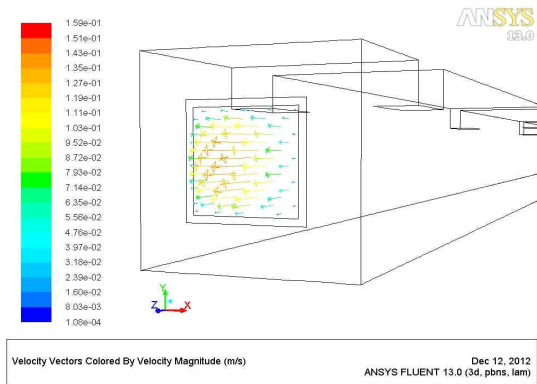


[그림 1-72] 단열재 표면에서의 온도 분포

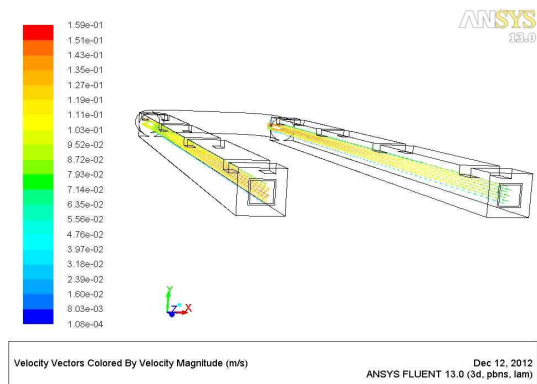
[그림 1-73]은 입구 단면의 온도분포로 Inlet 경계조건으로 입력한 0.0756m/s의 균일한 속도 분포를 보여주고 있으며 [그림 1-74]는 출구 단면의 속도 분포로 경계면 보다는 중앙으로 갈수록 속도가 빨라지는 형상을 보여주고 있다. [그림 1-75]는 수직 단면의 속도 분포이고 [그림 1-76]은 수평 단면의 속도분포를 보여주고 있다. 전체적으로는 U자 관을 돌면서 중심으로부터 멀어질수록 속도가 빨라짐을 알 수 있고 출구 쪽에서는 중심부의 속도가 빨라짐을 알 수 있다.



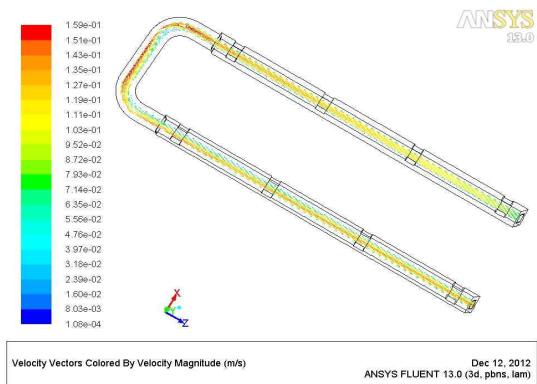
[그림 1-73] 입구 단면의 속도 분포



[그림 1-74] 출구 단면의 속도 분포

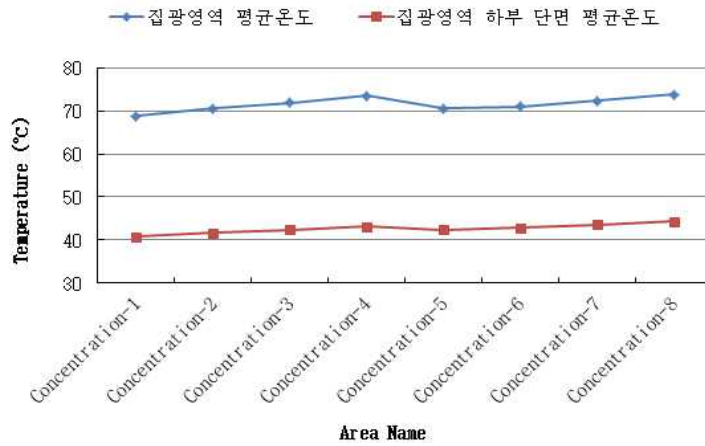


[그림 1-75] 수직 단면의 속도 분포



[그림 1-76] 수평 단면의 속도 분포

위 해석 결과를 종합해 보면 입구 40.47°C의 열매체를 공급하여 집광영역에서 가열된 후 출구에서 42.45°C로 배출되며, 셀 영역의 평균온도는 입구부터 증가하다가 Concentration-5 영역에서 낮아졌다가 다시 증가하는 양상을 보인다. 집광영역의 온도 및 집광영역 하부 단면에 대한 유체의 온도 분포를 [그림 1-77]에 나타내었다.

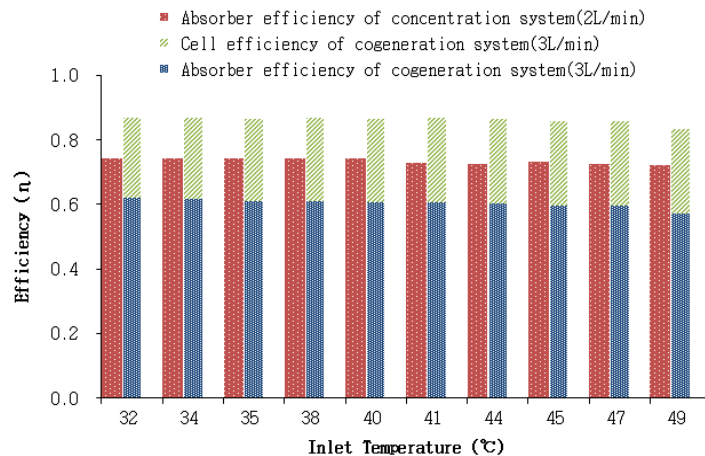


[그림 1-77] 집광영역의 온도 변화

(마) 실험 결과 종합 비교 분석

(1) 집열시스템과 복합시스템의 성능 비교 분석

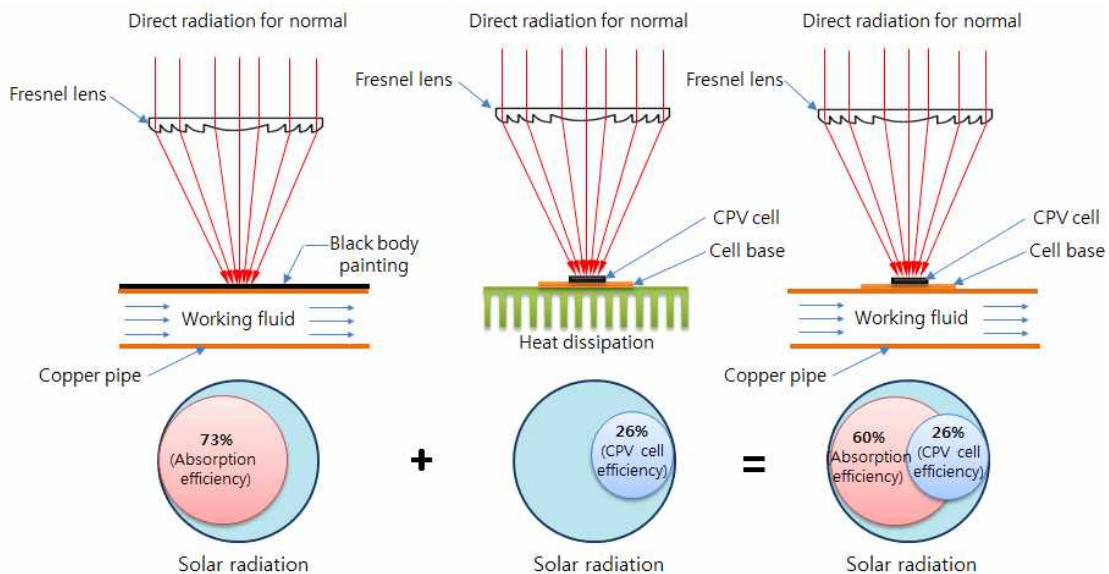
집열시스템과 복합시스템의 효율 비교를 위해 다음과 같이 집열시스템에서 가장 효율이 좋은 유량 2l/min에 대한 효율과 복합시스템의 유량 3l/min에 대한 효율을 [그림 1-78]에 그래프에 비교하여 표시하였다. 집열시스템의 평균 효율은 73%, 복합시스템의 집열 효율은 60%로 집열 성능만을 비교하면 집열시스템이 높지만 복합시스템은 CPV 셀에 의한 전력을 26% 생산하므로 합산 효율 86%로 집열시스템 보다 약 13% 높은 효율을 나타낸다. 이렇게 복합시스템이 높은 효율을 보이는 원인을 분석해 보면 다음과 같다.



[그림 1-78] 집열시스템과 복합시스템의 효율 비교

일반적으로 3중 집합 구조의 CPV 셀은 가시광선대역(600nm) 이하의 단파장 대역은 InGaP 박막에 의해 흡수되며, 근적외선 대역(800nm) 이하에서는 InGaAs 박막에 의해 흡수되고, 적외선 대역(1600nm) 이하의 파장은 Ge 박막에 의해 흡수된다. 이 과정에서 흡수되지 못한 밴드갭 보다 작은 에너지를 갖은 빛은 투과되면서 열로 발생된다. 즉 열에너지를 많이 포함하고 있는 적외선(780nm~2500nm) 파장의 일부만이 광전 변환에 사용되고 나머지는 열로 발생되며, 사용되지 않는 1600nm 이상의 파장도 대부분 열에너지로 변환되어 후면의 방열판으로 전달된다. 연구사의 그림[2-22]를 보면 필터를 이용하여 적외선 파장을 분리한 후 나머지 파장만을 셀에 조사시켜도 효율에 변화가 없는 것을 알 수 있는데 본 실험의 복합시스템의 합산 효율이 높게 나오는 원리를 설명해 줄 수 있다.

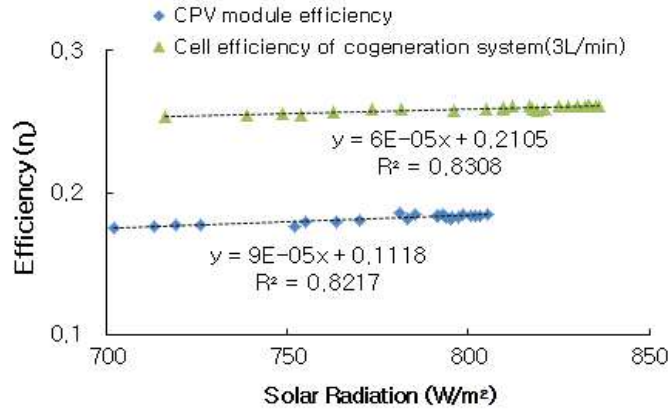
실제로 CPV 셀에서 사용하는 물질과 두께, 적층 구조, 반사방지코팅 및 텍스처링 (Texturing) 여부, 재결합률 등 수 많은 변수에 의해 열 발생 메커니즘이 달라짐으로 어느 정도 비율로 전기와 열이 발생하는지에 대해서는 본 시스템으로는 파악하기 어려우며 추가적인 장비와 실험이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 CPV에서 발생된 열을 효과적으로 흡수하여 전체 시스템의 효율을 높이는 방법에 대해서만 논의한다. [그림 1-79]는 집열시스템에 CPV 셀을 결합하여 복합시스템을 구성 할 때 합산 효율을 도식화하여 보여주고 있다.



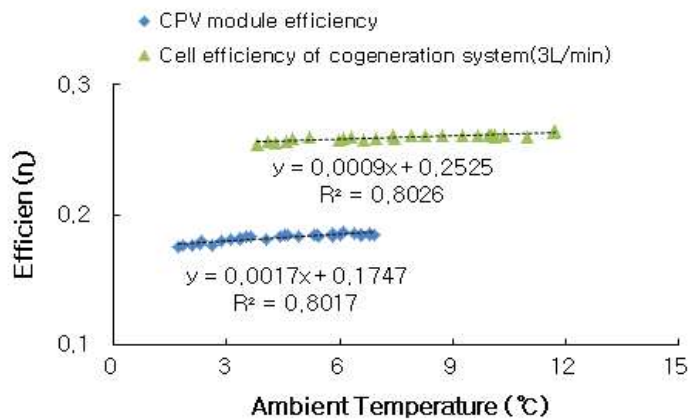
[그림 1-79] 복합시스템의 구성 시 합산 효율

(2) 복합시스템과 CPV 모듈의 비교 분석

복합시스템의 유량 3l에 대한 CPV 셀의 발전 효율과 CPV 모듈의 발전 효율을 일사량 기준과 외기온도 기준으로 비교 할 수 있도록 [그림 1-80]과 [그림 1-81]에 표시하였다. 그래프를 비교해 보면 CPV 모듈이 평균 18%의 효율을 나타내었고 복합시스템의 변환 효율이 26%로 약 8% 이상 높게 측정되었다.



[그림 1-80] 일사량에 따른 복합시스템의 셀 효율과 CPV 모듈의 효율 비교



[그림 1-81] 외기온도에 따른 복합시스템의 셀 효율과 CPV 모듈의 효율 비교

이와 같이 복합시스템의 효율이 높은 원인을 분석해 보면 다음과 같다. 두 시스템은 동일한 CPV 셀을 사용하고 동일한 SOG 타입의 프레넬 렌즈를 사용하여 구성하였지만 CPV 모듈은 2차 렌즈를 사용하였고, 초점거리가 256mm로 복합시스템 보다는 약 44mm 짧으며 셀의 냉각 방식이 히트싱크를 부착한 공랭식으로 동파이프를 이용하여 열을 회수하는 수냉식의 복합시스템과는 차이가 있다.

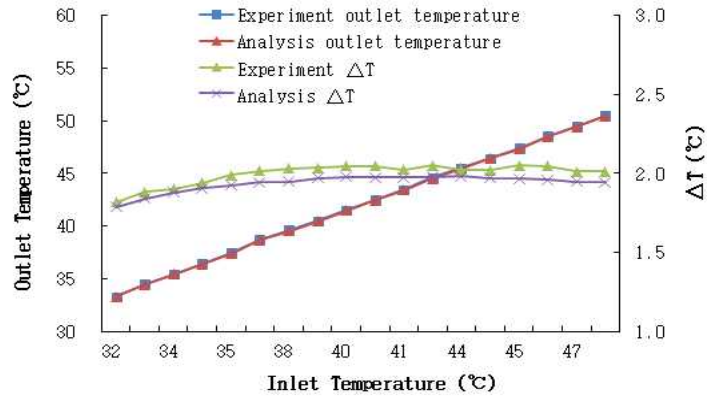
우선 초점거리에 의한 차이는 초점거리가 짧아지면 입사각이 증가하기 때문에 효율이 감소하는데, 복합시스템의 렌즈 최외각에서의 입사각은 25°, CPV 모듈의 최외각에서의 입사각은 21°로 4° 정도 차이가 나지만 입사각에 따른 효율 감소 그래프를 적용하여 개략적으로 계산해 보면 효율 차이는 1% 이내이다. 또한 냉각 방식의 차이는 셀의 온도 차이로 이어지는데 두 시스템의 셀과 주변을 적외선 온도계를 이용하여 측정해 본 결과 약 20°C 이하의 차이만을 보인다. 따라서 온도에 따른 효율 그래프를 이 결과에 적용해보면 집광비 500배에서 65°C와 90°C의 효율 차이가 약 2% 정도임으로 본 시스템에서도 냉각방식에 의한 차이는 2% 이하로 파악된다. 기타 셀의 개수와 집광 면적에 차이가 있지만 효율을 비교하기 때문에 큰 차이는 없으며 따라서 복합시스템과 CPV 모듈의 효율 차이는 2차 렌즈의 부착 여부에 가장 큰 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 즉, CPV 모듈에서 사용한 BK21 재질의 렌즈 집광률이 약 85%정도로 알려져 있어 이것에 의한 차이가 가장 클 것으로 보여지며, 또한 복합시스템은 정확한 집광을 위해 프레임을 머시닝센터를 이용하여 정밀하게 가공하여 조립하였고, 초점거리를 정확하게 맞출 수 있도록 1mm 피치의 나사를 네모서리에 설치하여 상하 방향의 초점거리를 정밀하게 조절할 수 있도록 하여 좀 더 집광율이 높은 것도 효율 차이의 한 원인이다.

(3) 집열시스템과 CFD 해석 결과 비교 분석

CFD 해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 집열시스템에서 가장 효율이 좋은 유량 2l/min에 대한 실험에서 측정한 입구온도, 일사량, 흡수관 주변 온도를 경계조건으로 설정하여 해석을 진행하였다. 해석 후 출구 단면의 평균 온도를 산출하여 실제 실험 결과와 비교하여 [그림 1-82]에 표시하였다. 해석 결과의 오차를 확인하기 위해 식[1-39]를 적용하여 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산한 결과 0.0605°C로 해석이 비교적 정확하게 이루어 졌음을 알 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad [1-39]$$

여기서 N = 데이터 개수, Y_i = 실험값, \bar{Y}_i = 해석값

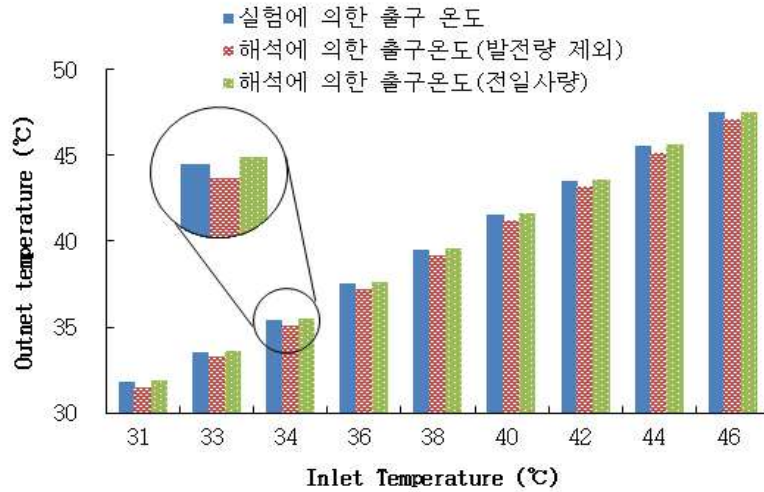


[그림 1-82] 출구온도 및 입출구 온도차에 대한 집열시스템과 CFD 해석 결과와의 비교

실제로 해석을 진행해 본 결과 효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 단열재의 대류열전달계수 k_B 와 흡수관 주변 온도였다. 그리고 이와 같이 정확한 해석이 가능한 이유는 예비실험을 통한 정확한 열전달계수 산출과 흡수관 주변온도의 정확한 측정이 이루어졌기 때문이다.

(4) 복합시스템과 CFD 해석 결과 비교 분석

복합시스템의 유량 $3l/min$ 에 대한 실험 측정값 중 입구온도, 일사량, 흡수관 주변온도를 경계조건으로 주고 해석을 진행하였다. 해석은 두 가지 경우로 나누어 진행하였다. 하나는 조사된 일사량 전체가 열로발생된다는 가정으로 해석하였고, 다른 하나는 전기를 생산하고 나머지만 열로 발생된다는 가정으로 두 번의 해석을 수행하였다. 측정 구간의 입구온도 평균은 $38.94^{\circ}C$ 이고 실험에 의한 출구 평균 온도는 $39.99^{\circ}C$, 발전량을 제외한 해석의 출구 평균온도는 $39.69^{\circ}C$, 전체 일사량에 대한 해석의 출구 평균온도는 $40.11^{\circ}C$ 로 해석되었다.



[그림 1-83] 복합시스템의 효율과 CFD 해석 결과 비교

이 결과는 실험에 의한 출구온도와 발전량을 제외한 해석의 출구온도 차이보다 전일사량을 흡수관의 공급 열량으로 하여 해석한 출구온도의 차이가 더 작다는 것을 보여주고 있다. 이것은 CPV 셀을 부착하여 발전을 할 때 집광영역에서 발생하는 열에너지는 발전으로 소모되는 열에너지 보다 많다는 것을 의미한다. 즉 전기를 발생시키는 파장과 열을 발생시키는 파장 대역이 동일하지 않기 때문에 복합시스템을 구성하면 발전으로 얻는 에너지와 집열로 얻는 에너지를 합하여 보다 더 높은 효율을 낼 수 있으며, 이 결과는 집열시스템과 복합시스템을 비교한 실험 결과와도 일치한다.

(5) 요약 및 결론

태양광 집열을 위한 집열시스템과 태양열과 전기를 동시에 생산하는 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 그리고 태양광 발전을 위한 CPV 모듈을 제작하여 성능실험을 수행하였고 결과를 상호 비교한 후 CFD 해석을 통하여 결과의 타당성 및 정확성을 확인하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 효율에 영향을 미치는 요소들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(가) 태양광 집열시스템 성능분석 결과

SOG 타입의 프레넬 렌즈로 집열기를 구성하여 입구온도와 유량을 변수로 집열 성능 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- ① 집열시스템에서 집광 영역의 흡수율은 높이고, 흡수기 주변의 대류에 의한 손실률은 줄여야 효율을 높일 수 있는데, 유량이 많아지면 흡수율도 높아지지만 손실율도 함께 높아짐으로 시스템에 따라 최고의 효율을 낼 수 있는 임계 유량이 존재하며 본 시스템에서는 2l/min 전후가 임계 유량으로 확인되었다.
- ② 유량에 관계없이 열매체 입구 온도가 상승하면 주변 온도와의 차이가 커지고 손실이 증가하여 효율이 감소한다.
- ③ 유량이 증가할수록 효율 방정식의 기울기가 증가함으로 시스템을 운영하는 주변 온도와 열매체 온도 차이에 따라 높은 유량(4l/min)에서 효율이 가장 높게 나오거나 가장 낮게 나올 수 있다.
- ④ 기후 조건에서 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 외기온도와 풍량으로 흡수관 주변의 단열처리나 아크릴을 이용한 바람막이는 효율 상승에 중요한 역할을 한다.

(나) 태양광-열 복합시스템 성능분석 결과

집열시스템의 집광영역에 CPV 셀을 부착하여 태양광-열 복합시스템을 구성하였고, 집열효율과 발전효율 그리고 합산효율에 대하여 실험 및 분석한 결과는 다음과 같다.

- ① 복합시스템도 집열 성능에서 임계유량이 존재하며 본 시스템에서는 3l/min 전후가 임계유량이다. 또한 임계유량은 시스템의 구성과 운영 환경에 따라 달라질 수 있다.
- ② CPV 셀을 부착하여도 집열 효율에 있어 열매체 온도가 상승하면 효율이 감소하고, 유량이 증가하면 효율 방정식의 기울기가 증가하여 효율의 변화가 커지는 특징은 집열시스템 단독으로 운영할 때와 동일하다.
- ③ CPV 셀은 표면 온도가 증가하면 전압은 감소하고, 일사량이 증가하면 전류가 증가한다. 그리고 효율은 전압과 전류의 곱으로 계산되어짐으로 열매체 온도와 일사량이 동시에 변하는 실외 실험으로는 효율의 변화를 파악하기 어렵다.
- ④ 복합시스템의 집열 효율과 CPV 셀의 발전 효율을 합하면 집열시스템 단독으로 운영하는 것보다 효율이 높으며, 이는 복합시스템의 집열은 주로 적외선 파장대역을 사용하고 CPV 셀은 주로 가시광선 파장대역을 사용함으로 사용하는 파장대역이 서로 달라서 가능한 결과이다.
- ⑤ 집열효율이 높은 유량에서 CPV 셀의 발전효율도 높게 나타났으며, 이는 집열효율이 좋으면 집광영역의 온도가 낮게 형성되기 때문에 CPV 셀의 발전효율도 높아지는 것이다.

(다) CPV 모듈 성능 분석에 대한 결론

태양광-열 복합시스템의 CPV 셀 발전효율과 비교하기 위해 히트싱크를 부착한 공랭식 방법으로 CPV 모듈을 제작하여 성능실험 수행하였으며, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① CPV 모듈의 효율에 영향을 미치는 변수로는 셀의 온도, 일사량, 집광비, 입사각, 집광률 등 많은 요소가 있지만 그중에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 요소는 2차 렌즈의 사용으로 셀 영역에 정확하게 집광시킬 수 있으면 2차 렌즈 사용 없이도 높은 효율의 시스템을 구축 할 수 있다.
- ② 일사량이 증가하면 충전률은 감소하고 일사량이 감소하면 충전률은 증가하는데 이것은 일사량이 증가하면 집광영역의 온도가 상승하면서 충전률이 감소하는 것으로 보인다.

제 2 절 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 개발

1. 실험재료 및 방법

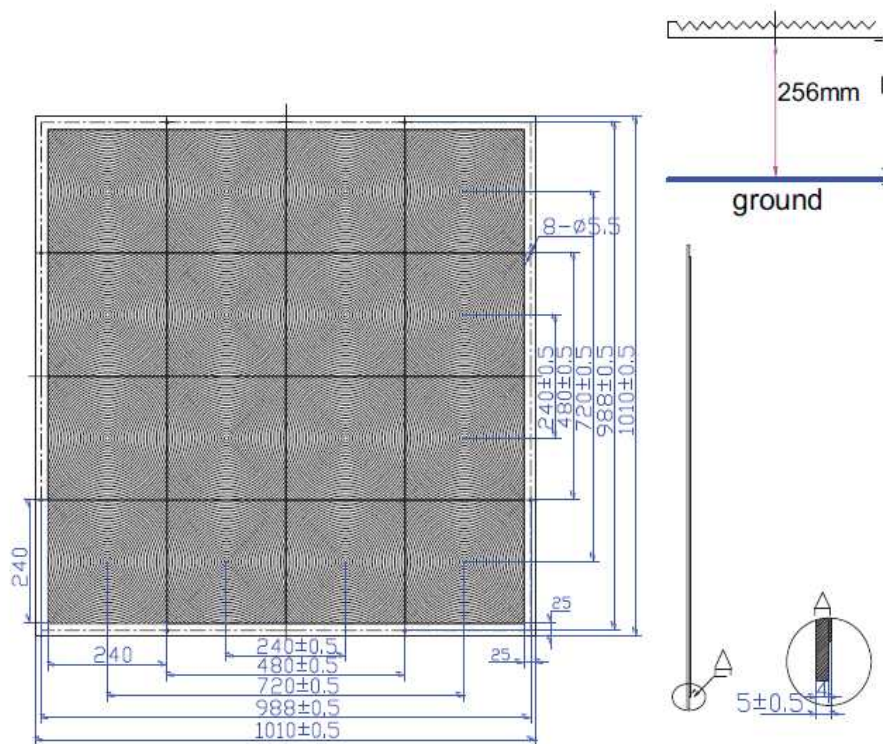
가. 성능 평가 기준정립

현재 추적식 집광형 태양광-열 복합시스템에 대한 설계 및 성능 평가 기준은 정해져 있지 않으며, 이에 따라 한국산업규격(KS)의 태양열 집열기 시험 방법-제1부: 집열창이 부착된 압력강하가 발생하는 액체식 집열기의 열적 성능(KS B ISO 9806-1:²⁰⁰³)과 신재생에너지 설비심사 세부기준의 실외 열효율 시험 조건을 적용하여 실험을 수행하였다. 날씨는 구름이 없고 청명한 날 오전 10시부터 오후 4시까지 실험을 진행하였으며, 법선면 직달 일사량이 $700\text{W}/\text{m}^2$ 이상일 때의 데이터만을 사용하였다. 유량은 평판형 집열기의 경우에는 제곱미터당 $0.02\text{kg}/\text{s}$ 를 기준으로 하지만 추적식 집광형 태양광-열 복합시스템의 경우 위 기준을 사용할 경우 효율이 낮게 형성됨에 따라 추가 예비실험을 통하여 $3\ell/\text{min}$ 에서 $7\ell/\text{min}$ 의 전후에 효율이 높게 형성됨을 확인하고 이를 기준으로 실험을 수행하였으며, 유량은 최소 $1\ell/\text{min}$ 이상 차이가 있어야 유량별 효율차이를 구분할 수 있기 때문에 유량간 차이를 $1\ell/\text{min}$ 로 결정하였다.

나. 다 모듈 복합시스템 구성 및 제작

(1) 집광기 구성

본 실험에서는 집광을 위해 SOG타입의 프레넬 렌즈를 사용하였다. SOG타입의 프레넬 렌즈는 저철분 강화유리에 실리콘을 접합하여 제작된 집광장치이며, 투과율이 높고 내후성이 뛰어나며 자외선에 의한 물성 저하가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 실험에 사용된 프레넬 렌즈는 하나의 렌즈크기가 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ 이며, 16개의 렌즈가 하나의 판으로 이루어져 1개의 집광모듈을 구성한 시스템이며[그림 2-1], 집광기 전체는 4개의 모듈로 구성되어 있다. 집광기 전체의 집열면적은 $0.24\text{m} \times 0.24\text{m} \times 16\text{EA} \times 4\text{EA} = 3.6864\text{m}^2$ 이며, 각 렌즈의 초점거리는 256mm 이고, 제조사에서 제공한 프레넬렌즈 제원은 [표 2-1]과 같다.



[그림 2-1] 프레넬 렌즈 도면.

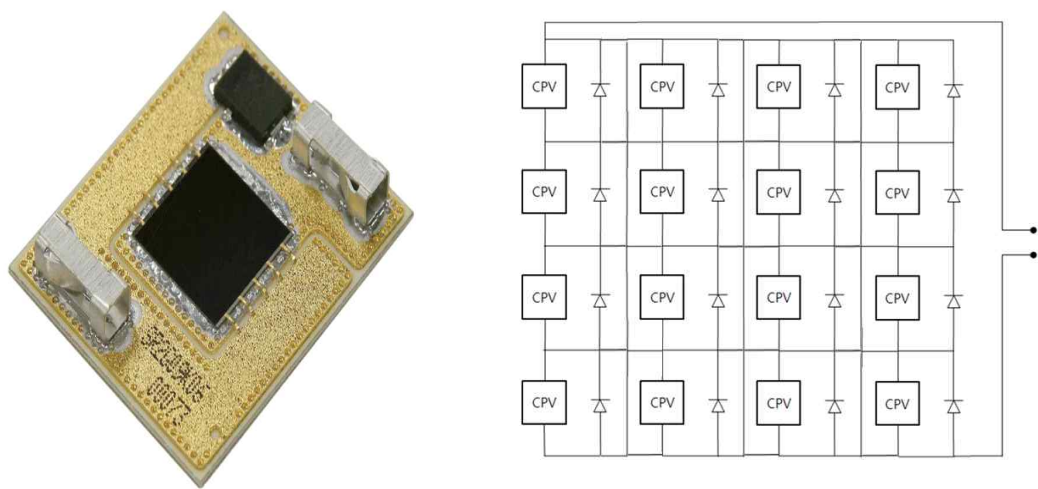
[표 2-1] 프레넬 렌즈의 제원

재질	SOG(Silicon on Glass)
1개의 모듈당 렌즈 수	16개
렌즈집광면적(Lens Area)	240mm±0.5mm × 240mm±0.5mm
렌즈 두께(Glass)	4.0mm
렌즈 두께(Silicon)	1.0mm±0.5mm
Groove Pitch	1.0mm
초점거리	256mm
집광비	1:576
투과율	82%
최대 입사각	25.11°

(2) CPV셀 및 흡수기 구성

본 실험에는 소형 복합 집광시스템에 이용한 것과 같은 CPV셀(CTJ(Concentrating Triple-Junction) Photovoltaic 10mm×10mm Cell, EMCORE, USA)을 사용하였다[그림 2-2 (A)]. CPV셀의 배치는 1개의 모듈 당 4행 4열로 배치하여 4개의 각 모듈

당 16개씩 총 64개의 셀을 배치하였으며, 64개의 셀을 32직렬 2병렬로 나누어 전체적으로 약 96V의 전압, 14A의 전류가 출력될 수 있도록 하였다. 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[그림 2-2 (b)]. CPV셀은 프레넬 렌즈의 초점영역보다 조금 위쪽에 위치하도록 하여 10mm×10mm셀 전체에 빛이 고루 집광 될 수 있도록 하였다.



(a) CPV 집광용 셀 실물 (b) CPV 집광용 셀 회로연결 구성도

[그림 2-2] CPV셀의 실물 및 연결 구성도(1모듈).

흡수기는 대류 열손실을 줄일 수 있도록 셀의 크기와 같도록 외경 24mm×24mm, 두께 1.5mm인 사각 동 파이프를 렌즈 초점 영역과 일치하도록 배치시켰으며, 셀에서 발생하는 열에너지를 열매체에 잘 흡수 시킬 수 있도록 셀 뒷면에 썬멀 글루(Thermal Glue, ARCTIC, USA)를 도포한 후 흡수기에 부착하여 열전달율을 증가 시켰다. 흡수기는 사각 프레임에 고정 후 프레임 모서리에 상하조절장치를 부착하여 초점에 따라 상하 방향으로 미세 조절이 가능하도록 제작하였다. 흡수기의 셀이 부착된 영역을 제외한 부분은 20mm두께의 단열재(가교발포폴리에틸렌폼)로 감싼 후 셀 영역 주변에는 열로 인한 화재나 손상을 방지하기 위하여 캡톤 테이프로 주변을 마감하였다. 썬멀 글루의 제조사에서 제공한 사진과 제원은 [그림 2-3], [표 2-2]와 같다.



[그림 2-3] 써멀 글루.

[표 2-2] 써멀 글루 제원

Thermal Conductivity	4.3W/mK
Temperature Range	-45°C to 200°C
Thermal Resistance	0.75°C/W

(3) 다 모듈 집광장치 제작

본 연구에서 다 모듈 집광장치의 기본 프레임은 알루미늄 프로파일(Model DF 3030, 30mm×30mm)을 사용하였으며, 제작 과정은 다음과 같다.

(가) 한 모듈의 집광장치 윗면은 프레넬 렌즈를 알루미늄 프로파일에 고정 시켜 집광기를 구성하였으며, 옆면은 프로파일로 프레임을 만든 후 아크릴로 막아 외기의 영향을 받지 않도록 하였다. 집광장치 내부로의 접근이 가능하도록 뒷면에는 2겹으로 창을 여닫을 수 있도록 제작하였고, 밑면은 아크릴판을 알루미늄 프로파일에 고정하여 외기와의 대류를 차단하였다[그림 2-4].

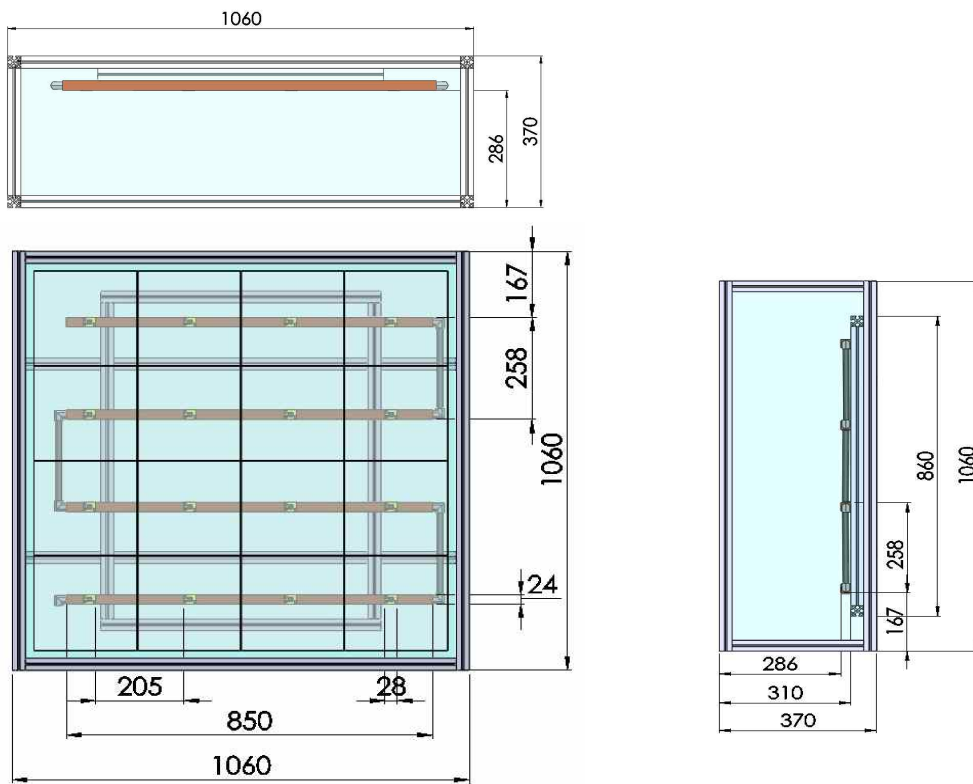
(나) 흡수기는 CPV셀에 의한 발전 후 셀에서 발생하는 열에너지를 열매체에 흡수시키기 위한 것으로, 사각 동 파이프(외경 24mm×24mm×1.5T, 길이 850mm)를 하나의 모듈 당 집광영역에 4개씩 4개의 집광모듈에 총 16개를 설치하여 흡수기로 사용하였다. 4개의 흡수기를 알루미늄 프로파일로 제작된 집광장치 하부의 지지대에 고정하였으며, 각 동관 흡수기들은 고무호수로 연결하여 열매체가 ‘ㄷ’ 모양으로 순환되도록 설계 및 제작하였다[그림 2-5 (a),(b)], [그림 2-6 (a)]. 지지대는 피치 1mm의 볼트를 사용하여 너트의 움직임에 따라 높이 조절을 가능하게 제작하였다.

(다) 렌즈를 통하여 모인 흡수기 표면 초점 부위에는 CPV셀을 부착하고, 흡수기 지지대의 높이조절을 이용하여 태양광의 셀 표면 집광면이 10mm×10mm가 되도록 조정 하였다. CPV셀은 써멀 글루를 이용하여 동파이프에 부착하여, 하부의 흡수관에 열전도가 잘되도록 하였다. 또한, 셀 집광영역을 제외한 흡수기에는 단열재를 감싸 외부로의 열손실을 줄였다. 셀 주위의 단열재 단면에는 내열성이 강한 캡톤 테이프를 부착하여 고열에 의한 단열재 손상을 방지하였다. [그림 2-6 (b)]은 우측 하단 첫 번째 모듈의 우측 하단에 부착된 4번째 셀의 실물로, 셀을 동파이프에 장착 후 단열재를 감싸고 그 위에 캡톤 테이프를 부착한 실물이다.

(라) [그림 2-7] 및 [그림 2-8]과 같이 각 집광장치 모듈을 알루미늄 프로파일을 이용해 제작된 하나의 후방지지대에 고정하여 결합하였으며, 모듈의 손상 부분이 없는지 점검한 후 태양 추적장치에 결합하여 다 모듈 집광시스템을 설비하였다. 다 모듈 집광장치의 열매체 흐름도는 [그림 2-9]와 같다.



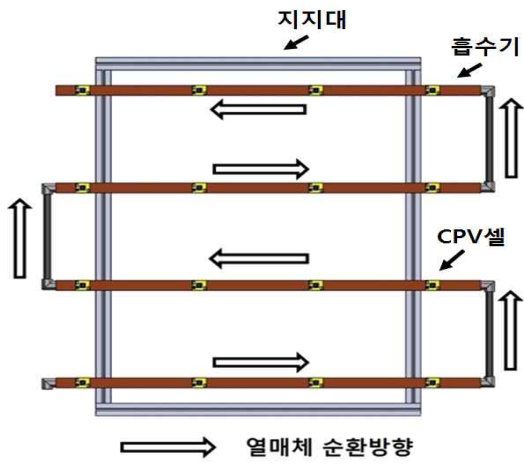
[그림 2-4] 집광장치 모듈 실물.



(a) 모듈의 정면도, 평면도

(b) 모듈의 측면도

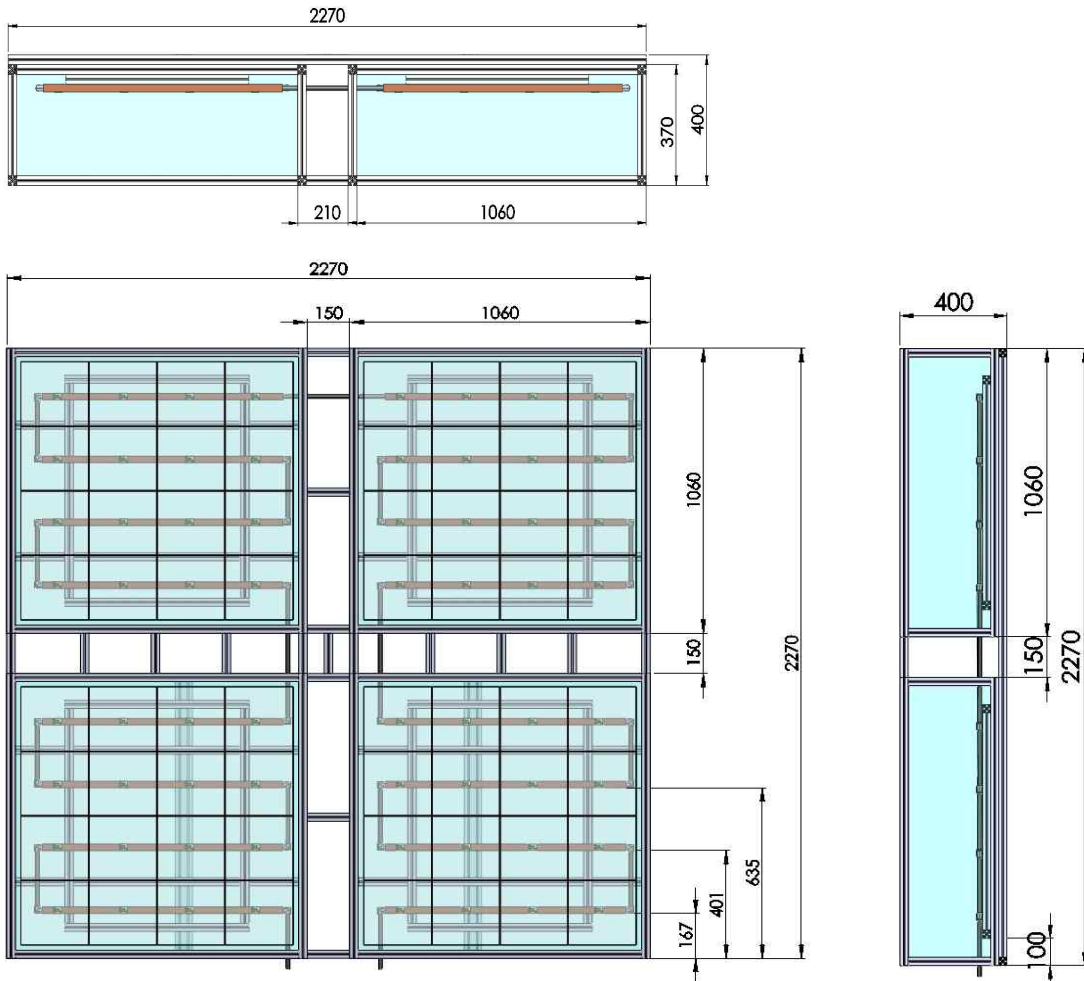
[그림 2-5] 모듈의 도면.



(a) 한 집광장치 모듈의 흡수기내 열매체 흐름도

(b) CPV셀 주변 단열처리

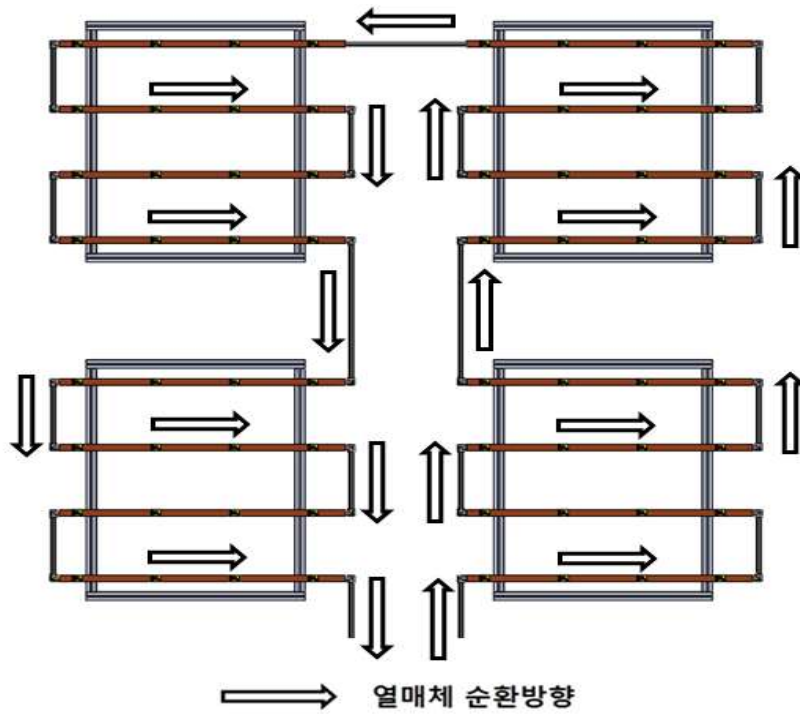
[그림 2-6] 한 모듈의 흡수기 내 열매체 순환경로 및 셀 주위의 단열처리.



[그림 2-7] 모듈 4개로 구성된 집광장치 도면.



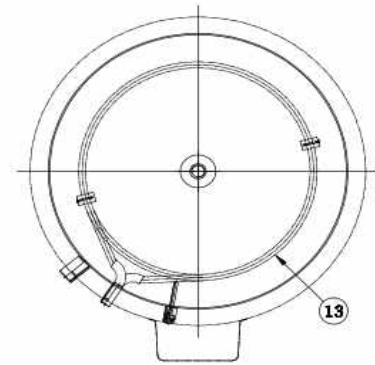
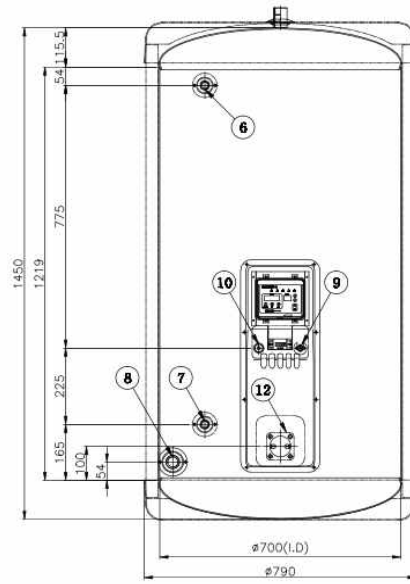
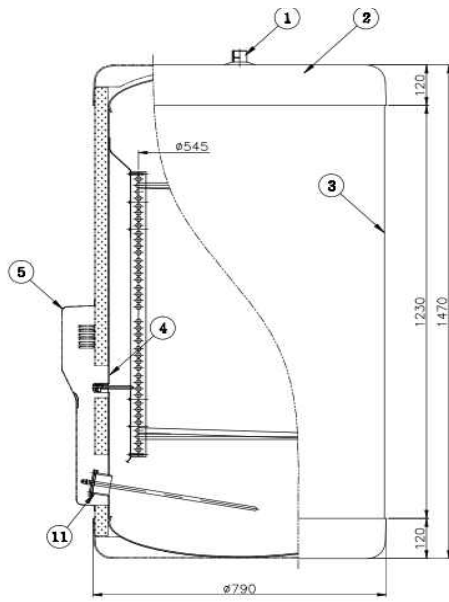
[그림 2-8] 다 모듈(4개 모듈)이 결합된 집광장치 실물.



[그림 2-9] 다 모듈(4개 모듈)이 결합된 집광장치 열매체 흐름도.

(4) 축열조 구성

본 실험에서 사용한 축열조(KNPE500-001, 강남태양열, 한국)는 총 용량은 500 ℓ 이다. 축열조 내통은 외부의 충격이나 온도변화에 강한 열간압연강판(SHPC)재질로 제작되었고, 외부는 폴리우레탄폼으로 단열되어 있으며, 외부 케이스는 칼라 함석판으로 제작되었다. 외부 직경 790mm, 내부 직경 700mm, 높이 1470mm로 제작되었고, 그 내부 용기 안의 열 교환기는 스테인레스강(STS 304)재질로 외경 15.8mm, 두께 1T, 내경 13.8mm, 총 길이 65m이며, 열교환기 표면과 축열조내 유체와의 접촉면적은 3.35m²이다. 열교환기는 스프링 형태로 축열조 내 외측으로 고정되어 있어 열 교환기 내로 집광장치의 흡수기로 부터 열매체가 들어와 순환하며 축열조 내의 물을 가열하는 형태로 축열된다[그림 2-9]. 축열조의 배관 및 연결부는 총 5개이며, 흡수기와 연결된 열교환기 입·출구 2개, 온수이용을 위한 입·출구 2개와, 상부의 급수용 입구 1개로 구성되어 있다. 축열조 내부 물의 온도계측을 위해 축열조 상부의 급수용 입구에 길이가 다른 3개의 온도센서(PT 100Ω)를 설비하여 축열조의 상, 중, 하 온도를 측정 할 수 있게 하였고, 열교환기기 입·출구에도 온도센서를 설치하여 총 5곳의 온도를 계측할 수 있게 하였다. 축열조의 실물 및 도면은 [그림 2-10 (a),(b)]와 같다.



(a) 축열조 실물

(b) 축열조 도면

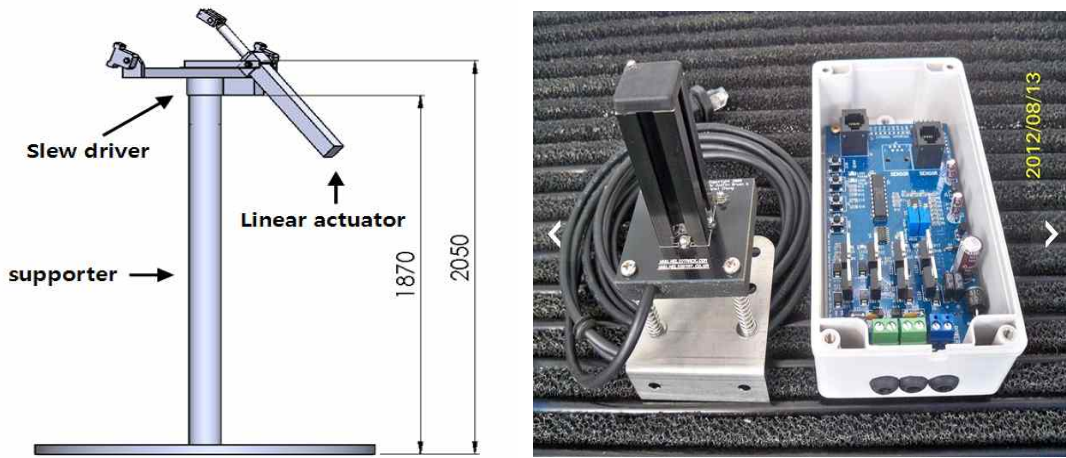
13	열교환기	1 EA	STS304	∅15.88
12	히터	1 EA	CU	5KW
11	히터소켓	1 EA	SS41	
10	온도센서	1 EA	황동	써미스터503ET
9	과속센서	1 EA	.	85N
8	DRAIN	1 EA	SS41	25A, L:60
7	급수구	1 EA	STS304	15A
6	급탕구	1 EA	STS304	15A
5	컨트롤박스	1 EA	EGI/분체도장	
4	탱크내롱	1 EA	SPHC 3.2T	500리터
3	탱크외장케이스		칼라장판	T: 0.5
2	PP커버	2 EA	복합 PP	
1	팬창소켓	1 EA	SS41	25A, L:60

[그림 2-10] 축열조.

(5) 태양 추적장치

본 실험에 사용된 태양 추적장치는 태양 추적 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 사용하며, 구동주기는 6초 주기이고, 추적에 의한 입사각 오차는 0.025도 이다. [그림 2-11 (a),(b)]는 태양 추적장치 및 센서 와 컨트롤러를 나타내고 있다.



(a) 태양 추적장치

(b) 센서 및 컨트롤러

[그림 2-11] 태양 추적 장치 및 센서 및 컨트롤러.

(6) 데이터의 수집장치 구성

(가) 온도 측정

온도 측정은 3도선식 측온저항체(RTD: Resistance Temperature Detector) 센서를 사용하였으며, 온도 센서는 흡수기 입구·출구 각 2개, 모듈 하나당 통과 시 온도 측정용 3개, 모듈 내부온도 측정 4개, 축열조 내부 3개로 총 14개의 온도센서를 사용하고 있으며, 0℃일 때와 100℃일 때의 온도를 calibration 하여, 실험오차를 줄였다. 데이터 로거(GL800, GRAPHTE, USA)을 사용하였으며, 온도 측정은 10초 간격으로 데이터를 수집하였으며, 데이터를 10분 단위로 평균을 내서 효율분석에 사용하였다. 데이터로거 및 측온저항체의 실물은 [그림 2-12]과 같고, 제조사에서 제공한 사양은 [표 2-3]과 같다.



(a) 데이터 로거

(b) 측온저항체(RTD)

[그림 2-12] 데이터 로거 및 측온저항체(RTD).

[표 2-3] 온도측정을 위한 데이터 로거 와 측온저항체(RTD) 사양

구분	측정범위	오차범위	비고
Data Logger (GL800)	$-100 \leq TS \leq 1370^{\circ}\text{C}$	$\pm(0.05\% \text{ of rdg} + 1^{\circ}\text{C})$	K-type 서머커플 사용시
RTD(PT100Ω)	-200°C 이상 650°C 미만	$\pm 0.15^{\circ}\text{C} + 0.002^{\circ}\text{C/t}$	DIN43760 Class A

(나) 일사량 측정

일사량계(Pyranometer EQ-08, Middleton Solar, Australia)를 실험장치에 부착하여 태양을 추적하는 동안 법선면 전일사량을 측정하도록 하였으며[표 2-4], [그림 2-13 (a)], 일사량 자료는 데이터로거(KL-200, Wellbian system, Korea)를 사용하여 수집하였다. 또한 외기온도와 풍속 및 수평면 전일사량을 측정하기 위하여 기상관측장비(Wireless Vantag Pro2 Plus, Davis Instruments, USA)를 이용하였다[그림 2-13 (b)].

[표 2-4] 일사량계(Pyranometer EQ-08) 사양

제품명	측정범위	스펙트럼 범위	분해능
Pyranometer EQ-08	0 ~ 4000W/m ²	300 ~ 3000nm	0.5W/m ² 미만



(a) 일사량계

(b) 기상관측장비

[그림 2-13] 일사량계 및 기상관측장비.

(다) 전압 및 전류 측정

전압 및 전류 측정은 solar module analyzer(PROVA 210, PROVA INSTRUMENTS INC., Taiwan)를 사용하였으며 개방전압, 단락전류, 최대전압, 최대전류, 최대전력, 충전률(FF: Fill Factor)을 측정하였고, 데이터는 5분단위로 측정하여 10분 평균을 내어 사용하였다.

(라) 열화상 분석

셀 주변의 온도 상승 정도를 확인하기 위해 열화상 카메라(NEC-Thermo Gear G100, NEC-Avio, Japan)를 이용하여 온도를 측정 및 분석하였다.

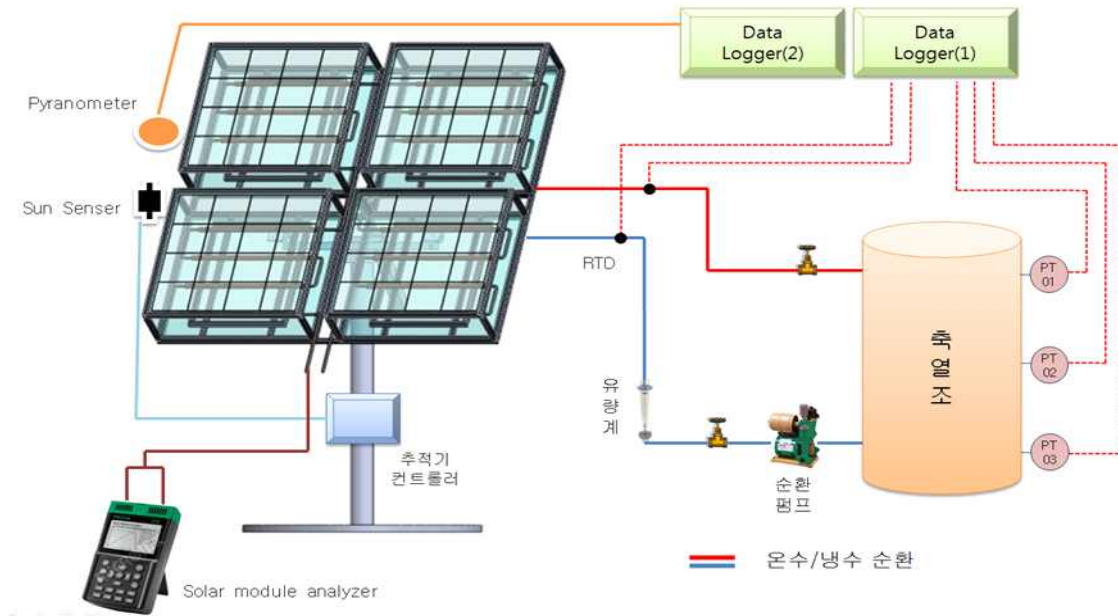
다. 다 모듈 복합 집광시스템 성능실험 장치 구성

본 실험장치의 설치 장소는 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상(위도 $37^{\circ}52'$, 경도 $127^{\circ}44'$)이며 장애물이 없어 태양광이 잘 조사되는 곳에 설치하였다.

4개의 모듈로 구성된 다 모듈 집광시스템은 기본적으로 프레넬 렌즈를 통하여 집광된 초점에 CPV셀을 부착하여 셀에서 전기에너지를 얻게 되며, CPV셀에서 전기를 생산한 후 발생하는 열에너지를 셀 뒷면에 설치된 흡수기내에 열매체를 순환시켜 회수하는 방식으로 이루어져 있다.

열매체 순환은 축열조 안의 열교환기에서 열매체가 순환펌프에 의해 순환되기 시작하여 유량계의 RTD센서를 거쳐 집광장치의 우측 하단 모듈의 흡수기내로 열매체가 유입되고 우측 상단 모듈, 좌측 상단 모듈, 좌측 하단 모듈의 흡수기를 거쳐 RTD센서를 지나 축열조 열교환기로 다시 들어가게 된다. 열매체는 각 모듈의 흡수기를 지날 때 마다, RTD센서가 부착되어 있어 각 모듈의 흡수기를 통과한 직후의

온도를 측정할 수 있어, 열매체가 1개의 모듈을 순환 할 때부터 4개의 모듈을 다 통과할 때까지의 열매체 온도를 측정 할 수 있다. 본 실험에 사용된 복합시스템의 전체 구성도는 [그림 2-14]와 같으며, [그림 2-15]는 태양광 복합시스템 실험장면이다.



[그림 2-14] 태양광-열 복합시스템의 전체 구성도.



[그림 2-15] 태양광-열 복합시스템.

라. 복합시스템의 실험 방법

(1) 열성능 실험 및 분석

본 연구에서는 실험이 가능한 청명한 날 오전 10시부터 오후 4시까지 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 성능실험을 수행하였다. 초기 축열조의 열매체 온도는 약 24 ~ 30℃였으며, 열매체의 유량을 3 l/min, 4 l/min, 5 l/min, 6 l/min, 7 l/min으로 변화시키면서 성능실험을 수행하였다. 유량에 따른 성능 분석결과 복합시스템의 최고효율을 갖는 순환유량을 구명하여, 그 유량에서의 열매체 유입온도 변화에 따른 집열 및 발전효율비교를 통해 순환 열매체의 온도가 상승함에 따른 효율 감소정도를 분석 하였다.

태양광-열 복합 시스템의 흡수된 집열 에너지는 단위시간당 흡수된 열량 Q 로 나타나며 계산식은 식 (2-1)과 같다.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (2-1)$$

여기에서

\dot{m} = 질량유량(kg/s)

C_p = 물의 비열(J/kg℃)

T_o = 흡수기 출구 열매체 온도(℃)

T_i = 흡수기 입구 열매체 온도(℃)

위 식(2-1)과 일사량계에서 측정된 일사량(I)를 사용하여 효율(η)에 대한 식(2-2)이 계산된다.

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

여기서

I = 일사량

A = 집열 면적

흡수기 내 열매체의 평균온도인 T_p 은 식(2-3)로 구하고, 집열기의 효율특성을 분

식하기 위해서 식(2-4)를 이용하여 집열효율을 분석하였다.

$$T_r = \frac{(T_o + T_i)}{2} \quad (2-3)$$

$$\eta = \eta_0 - a \times (T_r - T_i) / I_i \quad (2-4)$$

여기서

T_r = 흡수기 내 열매체 평균온도

T_a = 외기온도

태양광-열 복합 시스템 CPV셀의 발전 효율을 나타내는 계산식은 식 (2-5), (2-6)과 같다.

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (2-5)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2-6)$$

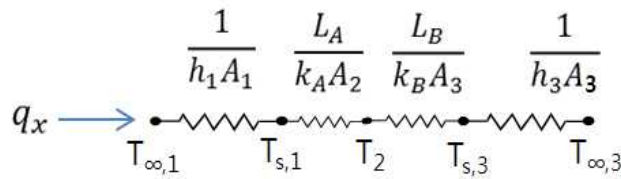
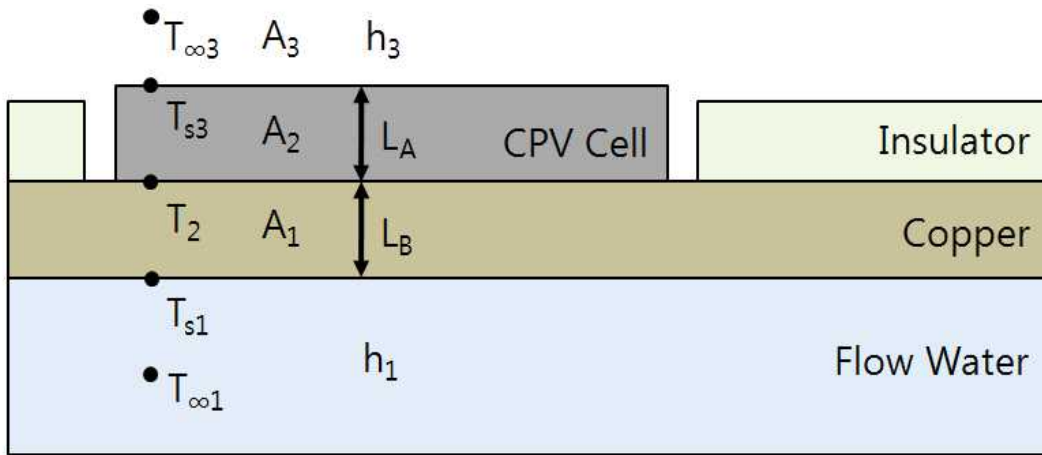
여기서 P_{\max} 는 최대출력, FF는 충전률, η 은 효율, P_{in} 입사된 일사 에너지이다.

(2) 법선면 직달일사량의 계산

본 연구에서는 추적식 집광형 시스템으로 법선면 직달 일사량을 효율계산에 사용해야하기 때문에, 법선면 전일사량(I_n) 과 수평면 전일사량(I_t)을 측정하고, 이론식을 사용하여 법선면 직달일사량을 구하였다.

(3) 이론적 열전달 계수의 분석

본 실험에 사용한 집광형 태양광-열 복합 시스템에 대한 이론적 열전달 계수를 산출하기 위해 복합 벽에 대한 등가회로로 모델을 단순화하고 해석영역에 대한 열전달계수들을 산출하였다.



[그림 1-16] 해석 영역에 대한 열전달 등가 회로.

열매체와 동파이프 내부 벽면 사이 그리고 셀 과 외부 공기와의 접촉면 사이에서는 대류열전달이 발생하고, 동파이프와 단열재는 두께 방향으로는 전도열전달이 발생한다. 이와 같은 복합벽에 대한 1차 열전달률은 식(2-7)으로 표현 할 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{\Sigma R_t} \quad (2-7)$$

여기서 $T_{\infty,1} - T_{\infty,3}$ 은 열매체와 외기온도의 온도차이며, ΣR_t 는 본 시스템에 포함된 모든 열저항을 의미한다. 따라서 수집된 에너지 q_x 는 식(2-8)과 같이 쓸 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{[(1/h_1 A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (1/h_3 A)]} \quad (2-8)$$

식 (3-13)을 각 요소별 등가 열회로(equivalent thermal circuit)로 표현 하면 식 (3-14)와 같으며, 이식을 Newton의 냉각법칙과 유사한 형식으로 표현하면 식(2-9)와 같이 쓸 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{(1/h_1A)} = \frac{T_{s,1} - T_2}{(L_A/k_A A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/k_B A)} = \frac{T_{s,3} - T_{\infty,3}}{(1/h_3A)} \quad (2-9)$$

$$q_x = UA\Delta T \quad (2-10)$$

여기서 U 는 총합열전달계수(overall heat transfer coefficient)로 복합벽에 대한 해석에 사용되며 ΔT 는 총합 온도차이다. 식(2-7)과 식(2-10)으로부터 $U = \frac{q_x}{A\Delta T}$ 으로 표현 될 수 있고 총합열전달계수로 표현하면 식(2-11)과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (1/h_3)]} \quad (2-11)$$

2. 실험 결과 및 분석

가. 다 모듈 복합시스템의 성능실험

(1) 다 모듈 복합시스템의 실험 방법 및 환경

다 모듈 복합시스템의 성능실험은 유량별로 2013년 10월 4일부터 11월 11일 사이에 이루어 졌으며, 실험장소는 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상(위도 37°52', 경도 127°44')이다. 실험에 사용된 축열조 용량은 500ℓ이며, 열매체 온도를 약 24~30℃로 설정 한 후 실험을 시작 하였으며, 열매체가 순환하며 온도가 점점 상승 하도록 구성하였다. 열매체 순환 유량은 3ℓ/min, 4ℓ/min, 5ℓ/min, 6ℓ/min, 7ℓ/min로 변경하면서 10초 단위로 열매체 온도 변화를 측정하였다. 또한 성능실험의 정확성을 위하여 흡수기의 입구 및 출구에는 각각 2개씩의 PT100Ω 축온저항체(RTD)를 설치하였으며, 정확한 온도 산출을 위하여 2센서의 평균 온도 값을 사용하였다. 각 유량별 실험 환경 조건은 [표 2-5]와 같다.

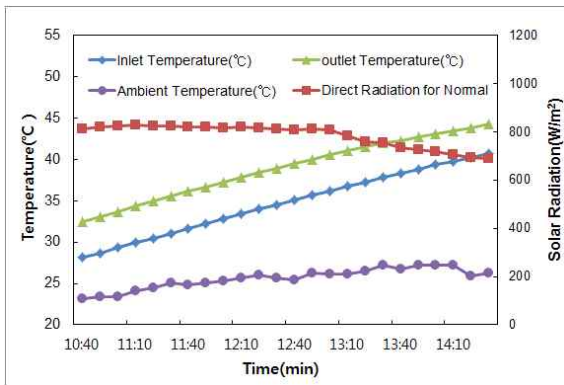
[표 2-5] 유량별 실험 환경 조건

유 량	실험일시	입구온도(℃)	일사량(W/m ²) (최대/최소)	외기온도 (℃)	모듈내부온도 (℃)	풍량(m/s) (최대/최소)
3ℓ/min	13/10/05	29.53 ~ 44.55	848.23 / 755.06	15.1 ~ 27.6	35.04 ~ 41.29	1.8 / 0.2
4ℓ/min	13/10/04	28.21 ~ 39.64	872.88 / 788.73	12.2 ~ 23.6	30.57 ~ 36.08	1.8 / 0.0
5ℓ/min	13/11/11	24.71 ~ 39.18	816.96 / 717.24	3.9 ~ 7.6	18.97 ~ 22.23	3.1 / 0.0
6ℓ/min	13/11/07	28.14 ~ 39.80	827.14 / 704.83	13.2 ~ 15.4	23.13 ~ 27.20	4.8 / 0.4
7ℓ/min	13/11/08	26.26 ~ 40.71	939.60 / 723.17	8.4 ~ 14.4	19.93 ~ 28.68	2.7 / 0.0

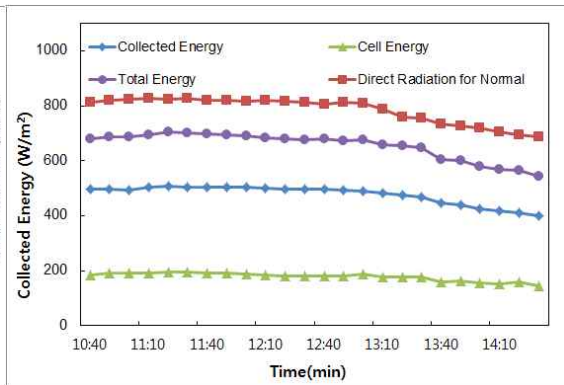
(2) 복합시스템의 성능실험 결과 및 분석

(가) 열매체 유량 6 l/min에 대한 성능 분석

본 실험에서는 실험범위 내에서는 유량 6 l/min에서 가장 큰 집열효율 및 발전효율을 나타냄으로 그에 대한 실험결과를 자세히 분석해 보면 다음과 같다. [그림 2-17]은 11월 7일 오전 10시 40분부터 오후 2시 30분까지 측정한 실험으로 10분 평균 일사량 및 입구, 출구, 집광장치모듈 내부온도를 나타낸 그림이며, 일사량은 $813.98\text{W/m}^2 \sim 687.55\text{W/m}^2$, 흡수기 열매체 입구 및 출구온도는 각각 $28.1^\circ\text{C} \sim 40.7^\circ\text{C}$ 및 $32.5^\circ\text{C} \sim 44.2^\circ\text{C}$ 였고, 집광장치 내부온도는 $23.1^\circ\text{C} \sim 26.2^\circ\text{C}$ 범위로 나타났다. [그림 2-18]은 일사량 변화에 따른 흡수기의 집열 에너지, 셀의 발전 에너지, 집열 및 발전의 총 수집 에너지를 나타낸 그림으로 일사량이 감소함에 따라 수집에너지도 같이 내려가는 추세를 잘 나타내고 있다. 즉, 집열에너지 $496\text{W/m}^2 \sim 401\text{W/m}^2$, 발전에너지 $184\text{W/m}^2 \sim 144\text{W/m}^2$, 총 수집에너지는 $680\text{W/m}^2 \sim 545\text{W/m}^2$ 범위에 있었다. 실험 시간동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 477W/m^2 및 178W/m^2 였고, 평균 합산 에너지는 655W/m^2 로 나타났다. 따라서 복합시스템의 열매체 유량 6 l/min에 대한 열에너지 및 전기에너지 평균 출력은 각각 1,758W 및 656W이고 평균 총 출력은 2,414W로 나타났다.

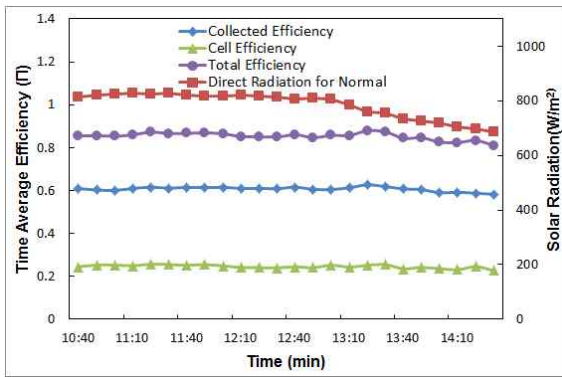


[그림 2-17] 복합시스템의 일사량, 모듈온도, 입출구 온도 변화.

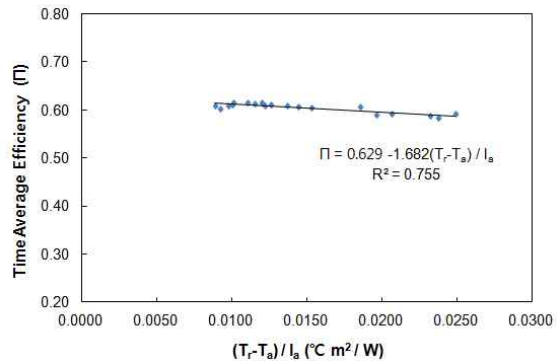


[그림 2-18] 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지.

[그림 2-19]는 시간평균 효율 그림으로 시간에 따라 일사량의 변화와 효율 변화를 나타내고 있다. 일사량이 점점 감소함에 따라 셀의 효율 및 집열효율은 변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 셀 효율의 평균값은 25%이였으며, 집열효율은 61%였고, 셀 및 집열 합산효율은 86%로 나타났다. [그림 2-20]은 열매체 평균온도, 외기 온도 및 일사량이 집열효율에 미치는 영향을 분석한 결과로 $(T_r - T_a)/I_a$ 가 증가함에 따라 집열효율은 감소하는 추세를 나타내고 있으며, 이는 외기온도와 열매체 온도 차에 따른 대류열손실의 결과로 생각된다.

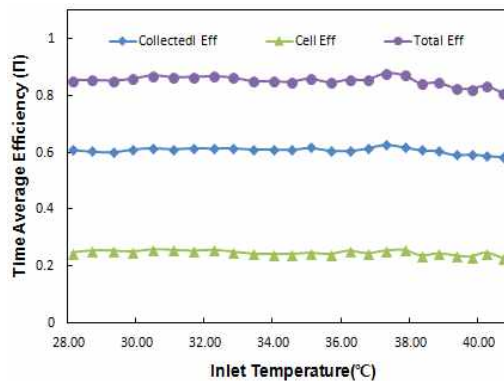


[그림 2-19] 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율 비교.



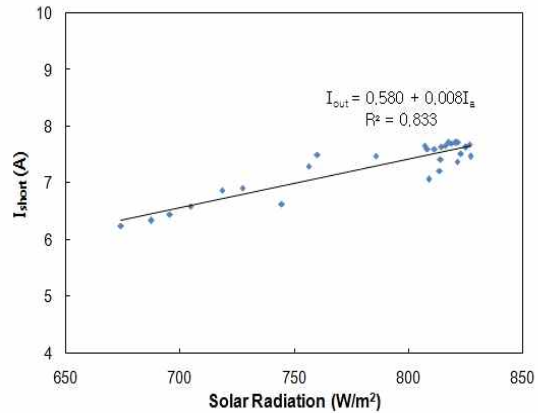
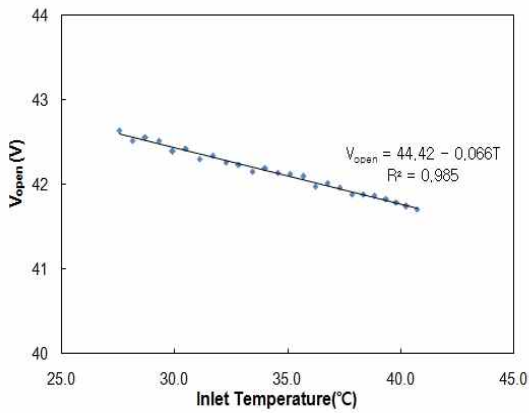
[그림 2-20] 복합시스템의 $(T_r - T_a) / I_a$ 변화에 따른 시간평균 집열효율.

[그림 2-21]은 열매체 입구온도에 따른 복합 시스템의 효율을 나타내고 있으며, 발전효율은 거의 변화가 없지만 집열효율은 열매체 입구온도가 증가함에 따라 약간의 감소 경향을 보여주고 있다. 이는 열매체 입구온도가 커질수록 흡수기내 열매체 온도와 외기온도와의 차이가 커져 대류 열손실이 커지기 때문인 것으로 생각된다.



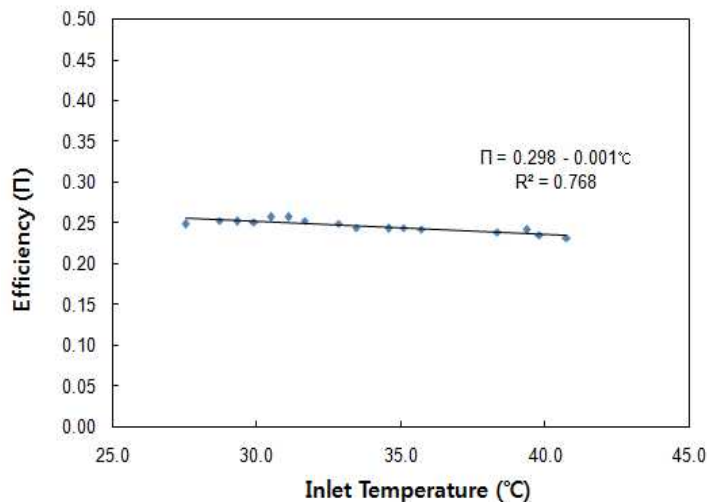
[그림 2-21] 복합시스템의 입구온도에 따른 온도평균 효율변화.

[그림 2-22]는 6 l/min에서의 열매체 입구온도에 따른 개방전압의 변화율을 나타낸 그래프로, 일반적인 태양전지 발전에서 셀의 온도가 높아지면 전압은 감소하게 되는데, 본 실험에서도 이와 같은 특징을 나타낸 그래프 이다. 즉 열매체 입구온도가 28°C일 때 42.5V를 나타냈으며, 40°C일 때 41.7V로 직선적인 감소 경향을 나타내었다. [그림 2-23] 또한 6 l/min에서의 일사량에 따른 단락전류의 그래프로 일반적인 태양전지와 같이 일사량이 증가함에 따라 전류 값이 높아지는 특징을 나타냈다. 즉, 일사량 674.2W/m²에서 6.25A로부터, 일사량 744.6W/m²에서 6.63A까지 증가하였다.



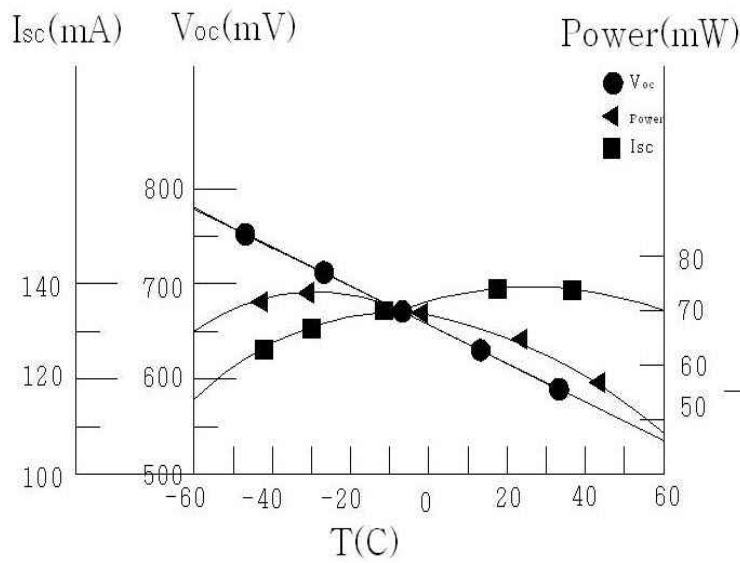
[그림 2-22] 복합시스템의 입구 온도에 따른 개방전압의 변화율. [그림 2-23] 복합시스템의 일사량 변화에 따른 단락전류의 변화율.

[그림 2-24]은 열매체의 온도증가에 따른 발전효율 변화를 나타낸 그림으로, 일반적인 시스템에서는 열매체 온도가 증가하면 셀의 온도가 상승하고 발전효율이 소폭 감소하는 것으로 알려져 있는데, 본 실험 결과에서도 셀 온도 상승에 따라 발전효율이 소폭 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 흡수기의 열매체 입구온도가 13.1°C 상승함에 따라 발전효율은 1.7% 감소함을 나타냈다.



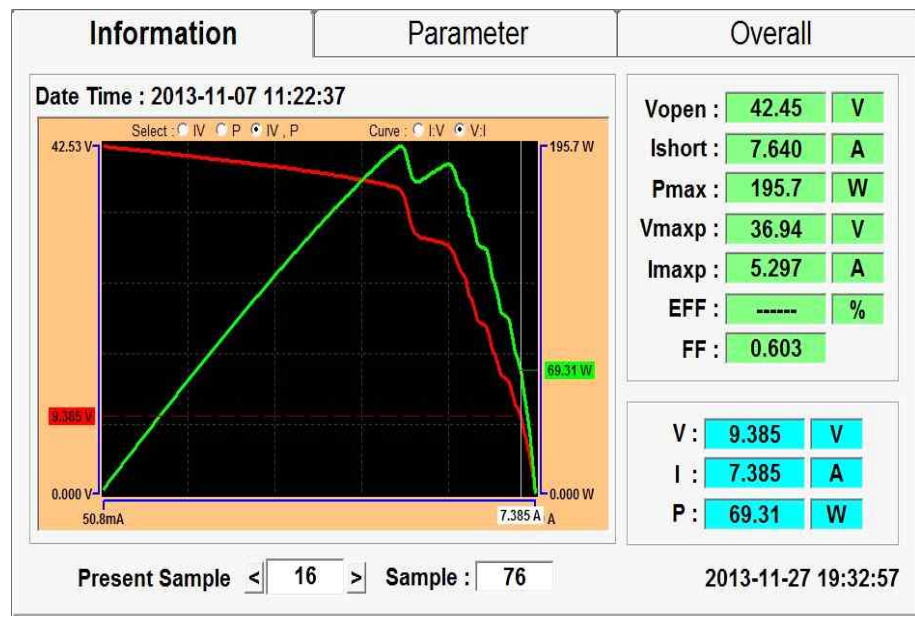
[그림 2-24] 입구 온도에 따른 셀 효율 변화율.

[그림 2-25]는 태양전지의 표면온도에 따른 I_{sc} , V_{oc} , P 의 상관그래프이다. 태양전지의 효율은 태양전지 표면의 온도와 밀접한 관련이 있으며 태양전지의 표면온도가 증가하면 전압이 감소하고, 전류량은 증가하는 경향을 나타내지만 전압의 감소 폭이 크기 때문에 온도가 상승함에 따라 효율은 감소하는 특성을 보인다(Baali, 1986).



[그림 2-25] 태양전지의 온도변화에 따른 I_{sc} , V_{oc} , P 의 상관그래프(Baali, 1986).

[그림 2-26]은 11월 7일 11시 22분 최대출력이 나타나는 시점에 Solar module analyzer로 2개의 모듈을 측정한 전압 전류(V-I)선도를 나타낸 화면이다. 개방전압은 42.45V에 단락전류 7.640A, 최대전압은 36.94V, 최대전류 5.297이고 충전율(FF)은 0.603이다.

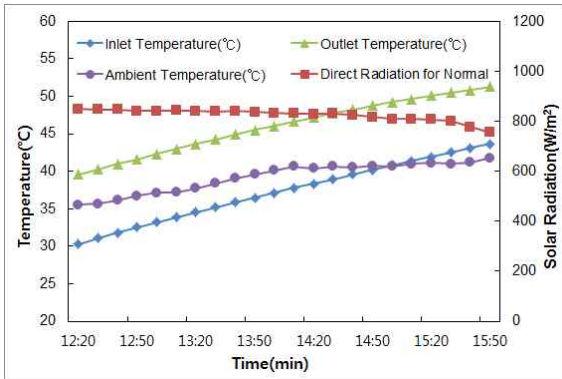


[그림 2-26] Solar module analyzer로 측정한 전압 전류 선도.

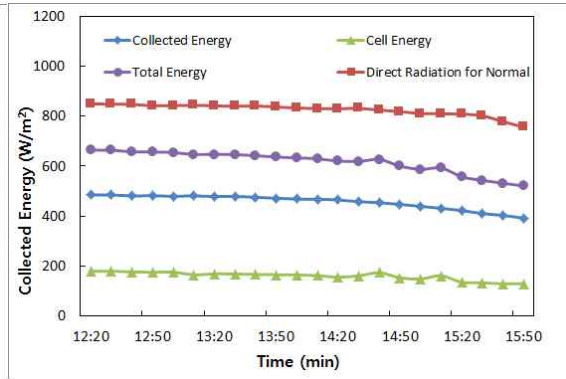
(나) 다 모듈 복합시스템의 유량별 성능 분석

① 열매체 유량 3ℓ/min에 대한 성능 분석

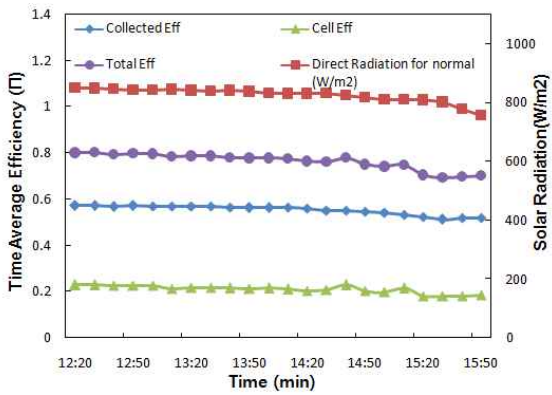
[그림 2-27 (a)]는 10월 5일 오후 12시 20분부터 오후 3시 50분까지의 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도를 나타낸 그림이다. 실험시작 시 일사량은 848.76W/m²이었고, 흡수기내 열매체 입·출구온도는 각각 30.3℃와 39.5℃였으며, 모듈내부의 온도는 35.5℃였다. 실험종료 시점인 210분 후에는 일사량 755.86W/m²으로 낮아졌고, 열매체 입·출구 온도는 각각 43.6℃ 및 51.2℃로 증가했으며, 모듈 내부온도는 41.7℃로 나타났다. [그림 2-27 (b)]는 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지에 대한 그림이다. 실험시작 시 일사량은 848.76W/m²였으며, 실험 210분 후 일사량이 755.86W/m²으로 낮아졌다. 실험 시간동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 457W/m² 및 160W/m²였고, 평균 합산 에너지는 617W/m²로 나타났다. 따라서 복합시스템의 열매체 유량 3ℓ/min에 대한 열에너지 및 전기에너지 평균 출력은 각각 1,685W 및 590W이고 평균 총 출력은 2,275W로 나타났다. [그림 2-27 (c)]는 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율 그림이다. 실험 기간동안 평균 집열 및 발전효율은 각각 55% 및 21% 였고, 따라서 수집 전 평균 합산효율은 76%로 나타났다. [그림 2-27 (d)]는 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 집열효율 변화를 나타낸 그림이다. $(T_r - T_a)/I_a$ 0.0074일 때 51.8%의 최저효율을 나타냈고, $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.016 일 때 57.0%의 최고효율을 나타냈으며, 평균 집열효율은 55%를 보였다. [그림 2-27 (e)]는 입구온도에 따른 온도 평균 집열효율 변화를 나타낸 그림이다. 흡수기 내 열매체 입구온도 30.3℃일 때 집열효율은 57.1%, 발전효율 22.8%, 총 합산효율 79.9%를 나타냈으며, 입구온도 43.6℃일 때 집열효율 51.8%, 발전효율 18.5%, 총 70.3%의 합산효율을 나타냈다. 따라서, 열매체 온도가 13.3℃상승함에 따라 집열 및 발전효율의 감소는 각각 5.3% 및 4.3%낮아져, 총 9.6%의 효율감소를 보였다.



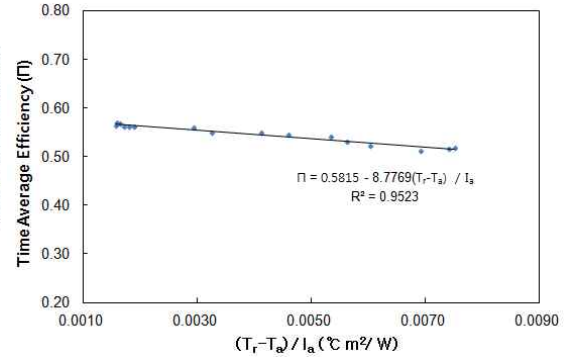
(a) 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도 비교



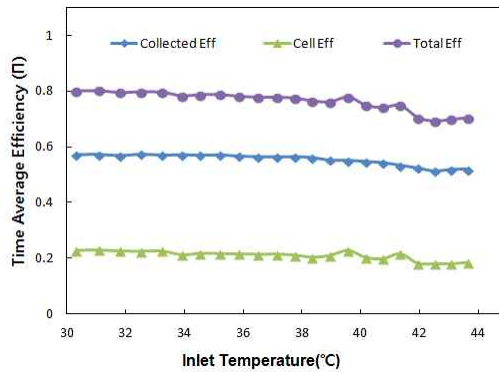
(b) 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집에너지.



(c) 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율비교



(d) 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 흡수기 효율 변화율

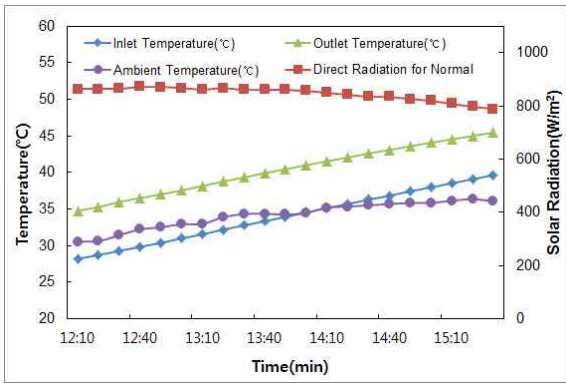


(e) 복합시스템의 입구온도에 따른 온도 평균 효율변화

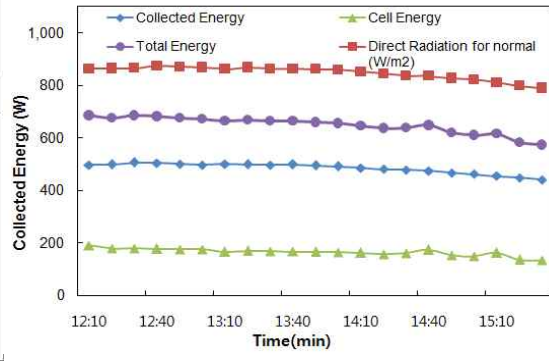
[그림 2-27] 다 모듈 복합시스템의 유량 3 l/min에 대한 효율분석.

② 열매체 유량 4 l/min에 대한 성능 분석

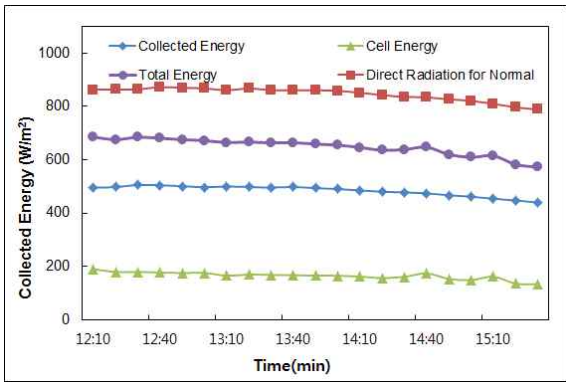
[그림 2-28 (a)]는 10월 4일 오후 12시 10분부터 오후 3시 30분까지의 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도를 나타낸 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $863.41\text{W}/\text{m}^2$ 이었고, 흡수기내 열매체 입·출구온도는 각각 28.2°C 와 34.7°C 였으며, 모듈내부의 온도는 31.7°C 였다. 실험종료 시점인 210분 후에는 일사량 $788.73\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌고, 열매체 입·출구 온도는 각각 39.6°C 및 45.4°C 로 증가했으며, 모듈 내부온도는 42.7°C 로 나타났다. [그림 2-28 (b)]는 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지에 대한 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $863.41\text{W}/\text{m}^2$ 였으며, 실험 210분 후 일사량이 $788.73\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌다. 실험 시간동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 $484\text{W}/\text{m}^2$ 및 $164\text{W}/\text{m}^2$ 였고, 평균 합산 에너지는 $648\text{W}/\text{m}^2$ 로 나타났다. 따라서 복합시스템의 열매체 유량 4 l/min에 대한 열에너지 및 전기에너지 평균 출력은 각각 1,784W 및 650W이고 평균 총 출력은 2,389W로 나타났다. [그림 2-28 (c)]는 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율 그림이다. 실험 기간동안 평균 집열 및 발전효율은 각각 57% 및 21% 였고, 따라서 수집 전 평균 합산효율은 78%로 나타났다. [그림 2-28 (d)]는 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 집열효율 변화를 나타낸 그림이다. $(T_r - T_a)/I_a$ 0.0082일 때 55.7%의 최저 효율을 나타냈고, $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.0014 일 때 58.4%의 최고효율을 나타냈으며, 평균 집열효율은 57%를 보였다. [그림 2-28 (e)]는 입구온도에 따른 온도 평균 효율 변화를 나타낸 그림이다. 흡수기 내 열매체 입구온도 28.2°C 일 때 집열효율은 57.4%, 발전효율 23.8%, 총 합산효율 81.2%를 나타냈으며, 입구온도 39.6°C 일 때 집열효율 55.7%, 발전효율 18.3%, 총 74.0%의 합산효율을 나타냈다. 따라서, 열매체 온도가 11.4°C 상승함에 따라 집열 및 발전효율의 감소는 각각 1.7% 및 5.5%낮아져, 총 7.2%의 효율감소를 보였다.



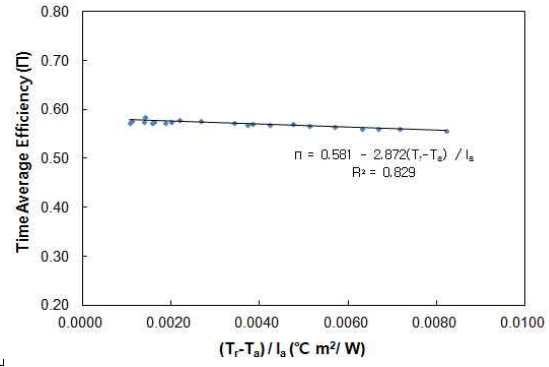
(a) 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도 비교



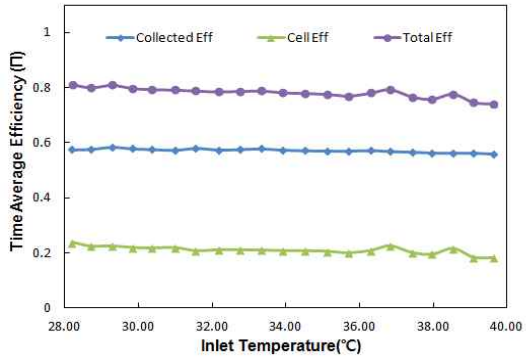
(b) 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집에너지.



(c) 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율비교



(d) 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 흡수기 효율 변화율

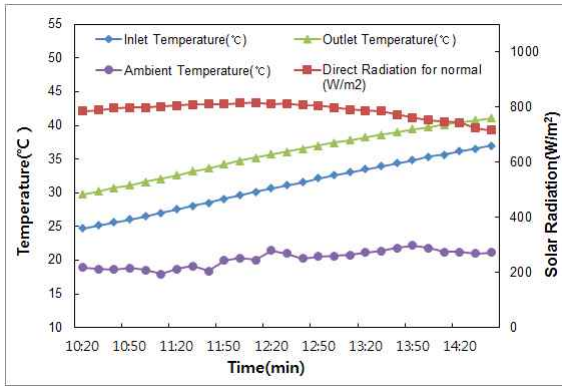


(e) 복합시스템의 입구온도에 따른 온도 평균 효율변화

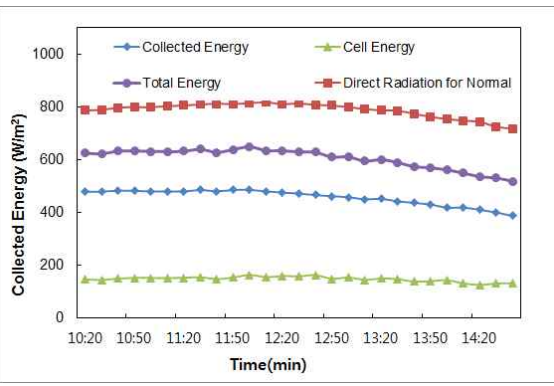
[그림 2-28] 다 모듈 복합시스템의 유량 4 l/min에 대한 효율분석.

③ 열매체 유량 5ℓ/min에 대한 성능 분석

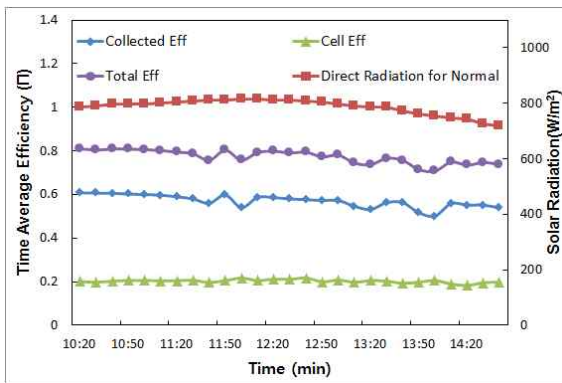
[그림 2-29 (a)]은 11월 11일 오전 10시 20분부터 오후 2시 40분까지의 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도를 나타낸 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $786.08\text{W}/\text{m}^2$ 이었고, 흡수기내 열매체 입·출구온도는 각각 24.7°C 와 37.0°C 였으며, 모듈내부의 온도는 18.9°C 였다. 실험종료 시점인 270분 후에는 일사량 $717.24\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌고, 열매체 입·출구 온도는 각각 37.0°C 및 41.0°C 로 증가했으며, 모듈 내부온도는 21.1°C 로 나타났다. [그림 2-29 (b)]는 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지에 대한 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $786.08\text{W}/\text{m}^2$ 였으며, 실험 270분 후 일사량이 $717.24\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌다. 실험 시간동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 $457\text{W}/\text{m}^2$ 및 $147\text{W}/\text{m}^2$ 였고, 평균 합산 에너지는 $605\text{W}/\text{m}^2$ 로 나타났다. 따라서 복합시스템의 열매체 유량 5ℓ/min에 대한 열에너지 및 전기에너지 평균 출력은 각각 1,685W 및 542W이고 평균 총 출력은 2,227W로 나타났다.[그림 2-29 (c)]는 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율 그림이다. 실험 기간동안 평균 집열 및 발전효율은 각각 57% 및 20% 였고, 따라서 평균 합산효율은 77%로 나타났다. [그림 2-29 (d)]는 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 집열효율 변화를 나타낸 그림이다. $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.0188일 때 53.2%의 최저효율을 나타냈고, $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.0105 일 때 60.8%의 최고효율을 나타냈으며, 평균 집열효율은 57%를 보였다. [그림 2-29 (e)]는 입구온도에 따른 온도 평균 효율 변화를 나타낸 그림이다. 흡수기 내 열매체 입구온도가 24.7°C 일 때 집열효율은 60.8%, 발전효율 20.2%, 총 합산효율 81.0%를 나타냈으며, 입구온도 37.0°C 일 때 집열효율 53.9%, 발전효율 19.9%, 총 73.7%의 합산효율을 나타냈다. 따라서, 열매체 온도가 12.3°C 상승함에 따라 집열 및 발전 효율의 감소는 각각 6.9% 및 0.3%낮아져, 총 7.3%의 효율감소를 보였다.



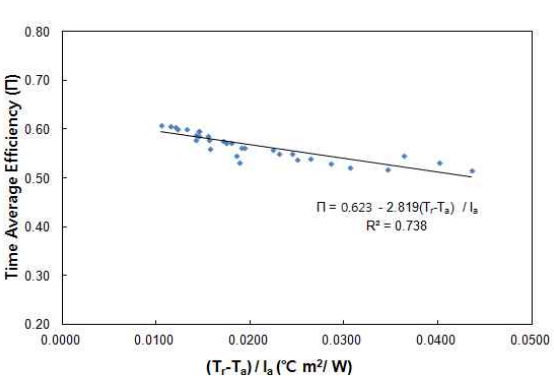
(a) 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도 비교



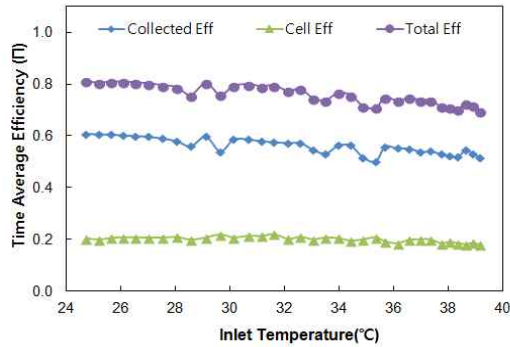
(b) 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집에너지.



(c) 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율비교



(d) 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 흡수기 효율 변화율

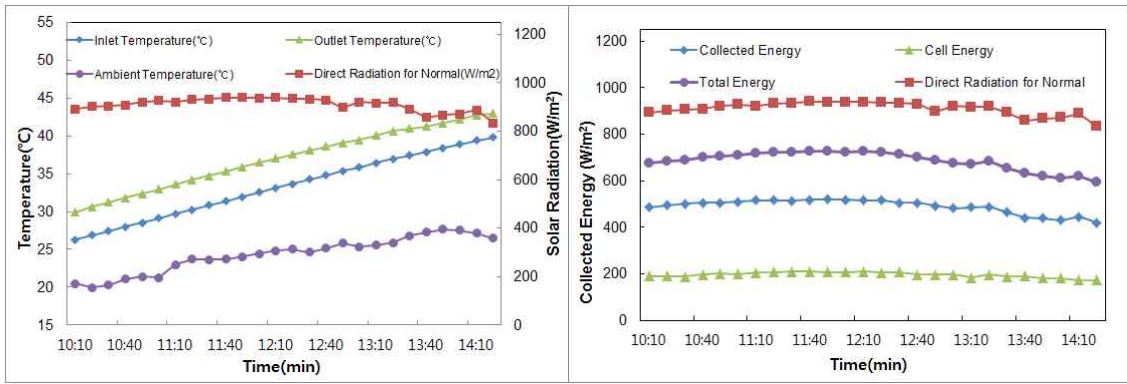


(e) 복합시스템의 입구온도에 따른 온도 평균 효율변화

[그림 2-29] 다 모듈 복합시스템의 유량 5 l/min에 대한 효율분석.

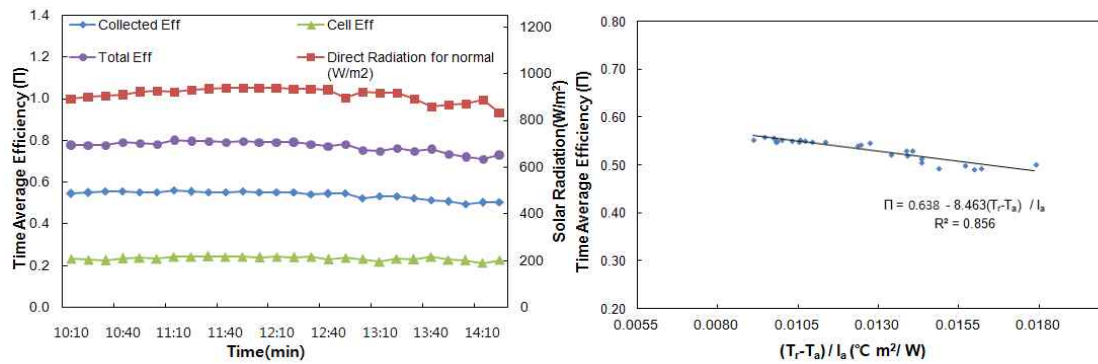
④ 열매체 유량 7ℓ/min에 대한 성능 분석

[그림 2-30 (a)]은 11월 8일 오전 10시 13분부터 오후 2시 23분까지의 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도를 나타낸 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $892.49\text{W}/\text{m}^2$ 이었고, 흡수기내 열매체 입·출구온도는 각각 26.2°C 와 29.9°C 였으며, 모듈내부의 온도는 20.4°C 였다. 실험종료 시점인 260분 후에는 일사량 $833.50\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌고, 열매체 입·출구 온도는 각각 39.7°C 및 42.9°C 로 증가했으며, 모듈 내부온도는 26.4°C 로 나타났다. [그림 2-30 (b)]는 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집 에너지에 대한 그림이다. 실험시작 시 일사량은 $892.49\text{W}/\text{m}^2$ 였으며, 실험 260분 후 일사량이 $833.50\text{W}/\text{m}^2$ 으로 낮아졌다. 실험 시간동안 수집된 평균 집열 및 발전 에너지는 각각 $490\text{W}/\text{m}^2$ 및 $196\text{W}/\text{m}^2$ 였고, 평균 합산 에너지는 $685\text{W}/\text{m}^2$ 로 나타났다. 따라서 복합시스템의 열매체 유량 7ℓ/min에 대한 열에너지 및 전기에너지 평균 출력은 각각 1,806W 및 723W이고 평균 총 출력은 2,529W로 나타났다.[그림 2-30 (c)]는 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율을 나타낸 그림이다. 실험기간동안 평균 집열 및 발전 효율은 각각 54% 및 23% 였고, 따라서 평균 합산효율은 77%로 나타났다. [그림 2-30 (d)]는 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 집열효율 변화를 나타낸 그림이다. $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.0148일 때 49.4%의 최저효율을 나타냈고, $(T_r - T_a)/I_a$ 가 0.0094 일 때 55.9%의 최고효율을 나타냈으며, 평균 집열효율은 54%를 보였다. [그림 2-30 (e)]는 입구온도에 따른 온도 평균 효율 변화를 나타낸 그림이다. 흡수기 내 열매체 입구온도가 26.2°C 일 때 집열효율은 54.3%, 발전효율 23.2%, 총 합산효율 77.6%를 나타냈으며, 입구온도 39.7°C 일 때 집열효율 50.3%, 발전효율 22.6%, 총 72.9%의 합산효율을 나타냈다. 따라서, 열매체 온도가 13.5°C 상승함에 따라 집열 및 발전 효율의 감소는 각각 4% 및 0.6%낮아져, 총 4.6%의 효율감소를 보였다.



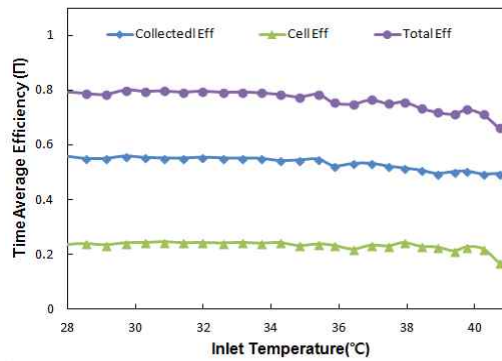
(a) 일사량 및 입·출구온도와 모듈 내부온도 비교

(b) 복합시스템의 흡수기 및 셀의 수집에너지.



(c) 복합시스템의 일사량 변화와 흡수기 및 셀의 시간평균 효율비교

(d) 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 변화에 따른 시간평균 흡수기 효율 변화율

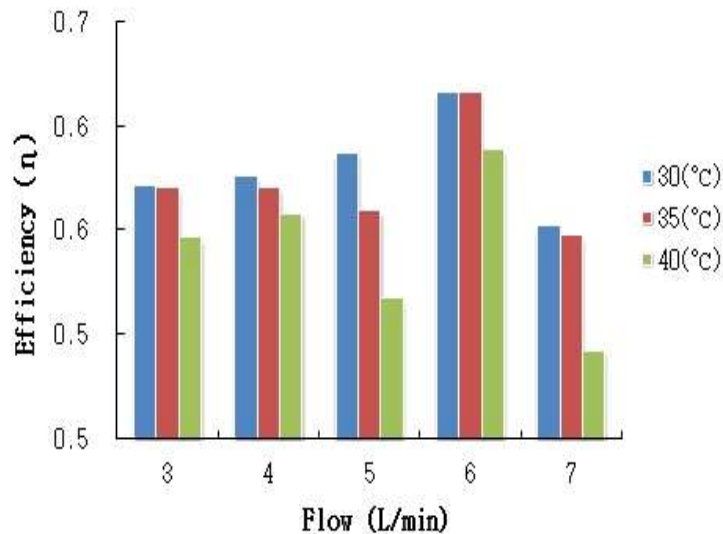


(e) 복합시스템의 입구온도에 따른 온도 평균 효율변화
[그림 2-30] 다 모듈 복합시스템의 유량 7 l/min에 대한 효율분석.

(다) 복합시스템의 유량별 집열효율 및 발전 효율 종합 비교분석

① 복합시스템의 유량 변화에 따른 온도별 합산 효율 비교

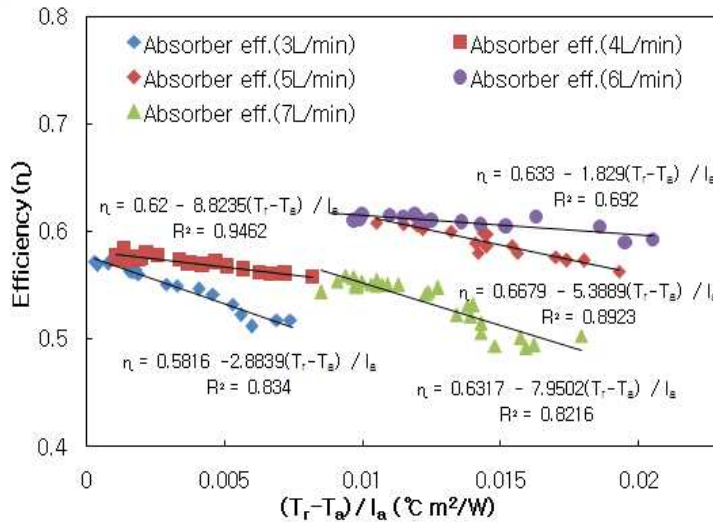
[그림 2-31]은 복합시스템의 유량 변화에 따른 온도별 합산 효율 비교 그림이다. 30℃, 35℃, 40℃ 모두 6 l/min에서 가장 높은 효율을 나타냈다. 하지만 3 l/min 과 4 l/min 때와는 달리 5 l/min, 6 l/min, 7 l/min은 40℃ 일 때의 효율이 큰 폭으로 하락하는 것을 볼 수 있으며, 이는 실험 날짜가 11월을 넘기면서 외기의 온도가 낮아짐에 따른 흡수기의 외부로 열손실이 커 집열효율의 큰 감소가 원인인 것으로 볼 수 있다.



[그림 2-31] 복합시스템의 유량 변화에 따른 온도별 집열 효율 비교.

② 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 기준 유량별 집열효율 비교

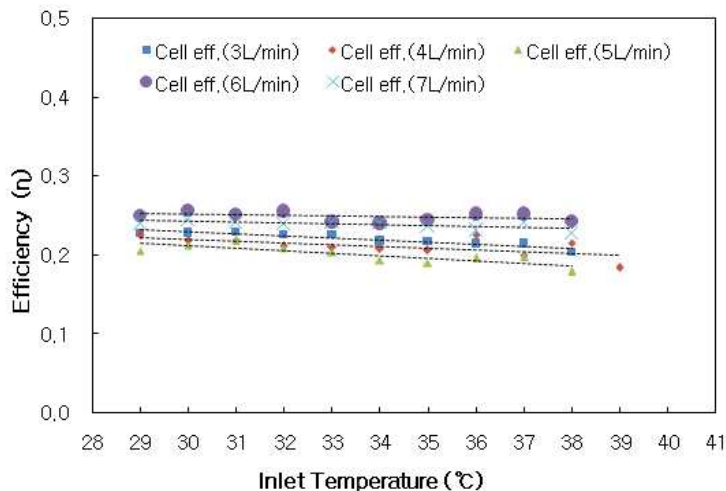
[그림 2-32]는 복합시스템의 $(T_r - T_a)/I_a$ 을 기준으로 한 실험범위 내에서의 집열 효율을 비교한 그림이다. 각 유량별 실험이 수행된 $(T_r - T_a)/I_a$ 값 범위 내에서 6 l/min의 유량이 평균 집열효율 61%로 가장 컸으며, 그 다음으로 5, 4, 3, 7 l/min의 각 유량에서 평균 집열효율이 각각 57%, 57%, 55%, 54%로 나타났다.



[그림 2-32] 복합시스템의 $(T_r - T_a) / I_a$ 에 따른 유량별 집열효율 비교.

③ 복합시스템의 입구 온도 기준 유량별 발전효율 비교

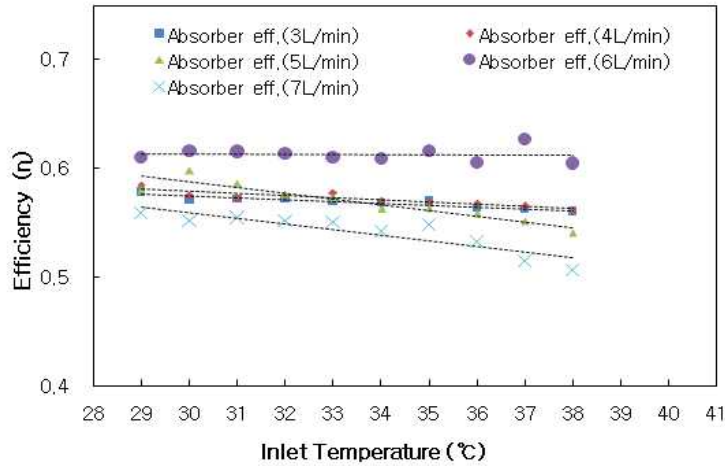
[그림 2-33]은 입구 온도에 따른 유량별 발전효율을 보여주고 있다. 모든 유량에서 입구온도가 상승함에 따른 효율변화는 거의 없었지만, 아주 적은 감소폭을 나타내고 있는 유량도 나타났다. 이는 셀의 온도가 상승하면서 나타나는 현상으로 보이며 CPV셀의 일반적인 특징이다. 유량별 발전 효율은 6ℓ/min에서 25%로 최대 발전효율을 나타내었으며, 그 다음으로 7ℓ/min이 24%로 두 번째 높은 발전효율을 나타 내었다. 또한 각 유량 3, 4, 5ℓ/min에서 각각 발전효율 21%, 21%, 20%를 나타내었다.



[그림 2-33] 복합시스템의 입구 온도 기준 유량별 발전효율 비교.

④ 복합시스템의 온도 기준 유량별 집열효율 비교

[그림 2-34]는 복합시스템의 유량별 흡수기의 열매체 입구온도에 따른 집열효율을 보여주고 있다. 흡수기의 열매체 입구온도가 29℃에서 38℃로 상승함에 따라 집열효율은 3, 4, 5, 7 l/min에서 각각 56%~58%, 56%~58%, 54%~60%, 51%~56%의 범위로 나타났고, 6 l/min일 때 60%~62%의 범위에서 집열효율을 나타내, 62%의 최고 집열효율을 보였다.



[그림 2-34] 복합시스템의 입구 온도 기준 유량별 집열효율 비교.

⑤ 유량에 따른 집열효율 및 발전효율 분석

복합시스템의 실험범위 내에서의 유량에 따른 효율을 분석해 보면, 평균 집열효율은 6L/min이 가장 높은 61%였으며, 5L/min, 4L/min, 3L/min, 7L/min에서 각각 57%, 57%, 55%, 54%의 순으로 평균 집열효율을 나타냈고, 발전 효율은 6L/min에서 가장 높은 25%였으며, 7L/min, 4L/min, 3L/min, 5L/min에서 각각 23%, 21%, 21%, 20% 순으로 나타냈다[표 2-6].

[표 2-6] 복합시스템의 유량에 따른 평균효율

유량	흡수 효율(%)	발전 효율(%)	합산 효율(%)
3 L/min	55	21	76
4 L/min	57	21	78
5 L/min	57	20	77
6 L/min	61	25	86
7 L/min	54	23	77

본 실험에서 집열효율 및 발전효율이 가장 높은 유량은 6 l/min일 때로 나타났다. 하지만 이론적으로는 유량이 증가함에 따라 효율은 점점 증가되어야 하지만 실제로는 그렇지 않다. 그 이유는 열매체 유량이 증가함에 따라 흡수되는 열량도 증가하지만, 외부로의 대류열손실량도 함께 커지면서 일정유량 이상이 되면 증가되는 열 흡수량이 열 손실량을 따라올 수 없는 지점이 생기며 본 실험에서는 6 l/min 이상 증가하면 열 손실량이 열 흡수량보다 높아지는 것을 알 수 있다. 즉 최대의 열을 흡수하고 최소의 열손실을 나타내는 임계유량은 6 l/min인 것으로 나타났다.

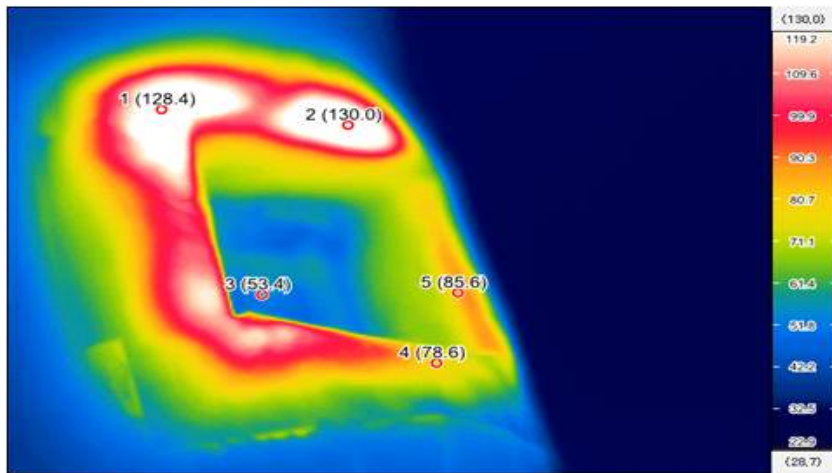
이러한 실험값을 기준으로 총합열전달계수 $U = q_x / A\Delta T$ 값을 계산하면 [표 4-3]과 같으며 6 l/min일 때 가장 높은 효율을 가짐을 알 수 있다.

[표 2-7] 복합시스템의 유량에 따른 총합열전달계수.

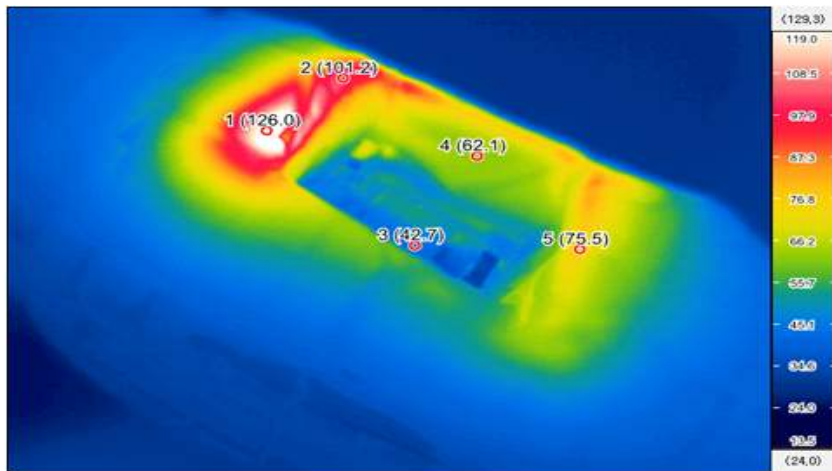
	일사량 (W/m^2)	흡수량(W)	단위면적당 흡수량(W/m^2)	손실량	총열전달계수 ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)
5 l/min	805.13	1,700	461	344.13	32.93
6 l/min	827.14	1,863	505.37	321.77	62.8
7 l/min	928.55	1,863	505.37	423.18	43.79

⑥ 열화상 온도 분석.

[그림 2-35 (a)]는 유량이 4 l/min일 때 실험 중 열화상 사진이다. 1번, 2번 지점은 캡톤 테이프가 붙어있는 영역으로 온도가 다른 영역에 비해 높은 것을 알 수 있는데, 이는 집광된 태양에너지가 셀 주변의 흡수기로 전달되지 못한 결과로 볼 수 있다. 4번, 5번 지점은 캡톤테이프 안쪽 단열재 단면의 영역으로 캡톤테이프에서 가열된 열이 단열재 안쪽 흡수기로 열이 전달되어 점점 감소되는 것을 알 수 있다. 3번 지점은 집광된 셀의 온도로 셀 후면에 있는 흡수기의 열매체에 열이 잘 전달되어 낮은 온도를 나타낸 것으로 보인다. [그림 2-35 (b)]는 유량이 6 l/min일 때 실험 중 열화상 사진이다. 측정 지점은 위의 유량 4 l/min 일 때와 같으며, 유량 4 l/min 일 때 보다 전체적인 영역에서 온도가 낮아진 것을 알 수 있는데, 이는 유량의 증가에 따라 흡수기내 열매체로의 열전달율이 커진 것으로 생각된다. 각 영역에 대한 자세한 온도는 [표 2-8]과 같다.



(a) 유량이 4 l/min일 때 열화상 카메라 촬영사진



(b) 유량이 6 l/min일 때 열화상 카메라 촬영사진

[그림 2-35] 유량변화에 따른 열화상 촬영사진.

[표 2-8] 열화상 카메라로 측정한 각 지점별 온도

유 량	1번 지점 (캡톤 테이프)	2번 지점 (캡톤 테이프)	3번 지점 (CPV 셀)	4번 지점 (단열재 단면)	5번 지점 (단열재 단면)
4 l/min	128.4℃	130.0℃	53.4℃	78.6℃	85.6℃
6 l/min	126.0℃	101.2℃	42.7℃	62.1℃	75.5℃

3. 요약 및 결론

본 연구에서는 16개의 SOG 프레넬 렌즈 및 16개의 집광용 CPV셀로 1개의 모듈을 구성하였으며, 4개의 모듈을 통합하여 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 제작하였다. 따라서 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템의 총 64개 프레넬 렌즈는 각 CPV셀에 빛을 집광시키며, 집광된 빛은 CPV셀을 통하여 전기에너지로 전환된다. 또한 CPV셀 하부에 설치된 흡수기내에 열매체를 순환시킴으로써 CPV셀로 집광된 열에너지를 회수하게 된다. 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 집열 및 발전 성능시험 및 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가. 본 연구에서 제작된 다 모듈 태양광-열 복합시스템은 유량 6 l/min 에서 최고 효율을 나타내었으며, 이는 7 l/min 일 때 6 l/min 보다 높은 에너지 흡수율을 나타내지만, 대류 열손실에 의한 외부로의 열 손실량이 크기 때문인 것으로 파악되며, 6 l/min 일 때가 최고효율을 갖는 임계유량임을 알 수 있었다.
- 나. 유량과는 관계없이 열매체의 입구온도가 상승하게 되면, 주변 외기와 온도차가 커지게 되며, 그에 따른 열손실이 증가하여 집열효율은 감소하였다.
- 다. 본 연구에 사용된 CPV셀은 온도가 증가하면 전압은 감소되고, 일사량이 증가하면 전류가 증가하는 일반적인 태양전지와 같은 특성을 보이고 있으며, 일사량이 증가함에 따라 CPV셀의 효율은 계속 상승해야하나 한계치가 존재하는 이유는 일사량 증가에 따른 전류의 증가폭보다 온도상승에 따른 전압의 감소폭이 더 크기 때문에 셀의 온도가 일정수준이상 올라가면 효율은 감소되는 특성을 보인다.
- 라. 복합시스템의 집열효율과 발전효율을 합하면 집열시스템 단독으로 운영하는 것보다 높은 효율이 나타나게 되는데, 이는 집광된 태양광이 CPV셀에 의해 발전이 이루어지고, 집광된 고온의 태양 복사열은 다시 회수되어 태양광 발전과 태양열 집열이 동시에 이루어지기 때문이다.
- 마. 집열효율이 높은 유량에서 CPV 셀 효율도 높게 나타나며, 이는 집열효율이 좋으면 집광영역의 온도가 낮게 형성되기 때문에 CPV 셀 효율도 높아지기 때문인 것으로 판단된다.

제 3 절 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템 온실난방 실증

1. 에너지 자립형 온실난방 시스템 구축

(1) 태양광 발전 부대설비

(나) 충전 컨트롤러

단락, 과전압, 과전류 및 고온 등으로부터 전기적인 보호가 가능하고 축전지의 효율적인 충전을 위해 다 모듈 태양광-열 복합시스템과 축전기 사이에 충전 컨트롤러를 온실 내 부대시설 설비를 위한 공간에 설치하였다. 설치된 충전 컨트롤러의 사양은 [표 3-1]과 같으며 실물사진은 [그림 3-1]과 같다.

[표 3-1] 충전 컨트롤러 제원

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



[그림 3-1] 충전 컨트롤러

(나) 축전지

본 실험에 사용된 축전지는 다 모듈 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. 온실 한 쪽 끝에 부대시설 설비를 위한 공간에 알루미늄 프로파일을 이용해 2층의 틀을 제작하여 아래위 4개씩 총 8개의 축전지를 설치하였다. 축전지의 제원은 [표 3-2]와 같으며 실물은 [그림 3-2]와 같다.

[표 3-2] 축전지 제원

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



[그림 3-2] 태양광-열 복합시스템으로부터 생산된 전지 저장을 위한 축전지

(다) 인버터

다 모듈 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 및 부대설비에 전력을 공급하는데 이용된다. 인버터의 제원은 [표 3-3]과 같으며 실물은 [그림 3-3]과 같다.

[표 3-3] 인버터 제원

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



[그림 3-3] 인버터 실물

(라) 전력량계

다 모듈 태양광-열 복합시스템으로부터 생산된 DC 전력을 확인할 수 있도록 충전컨트롤러와 축전지 사이에 그림 [3-4 (a)]와 같이 DC 전력량계(WK1, (주)웰케이원, 한국)를 설치하였고, 제원은 표[3-4]와 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[그림 3-4]. 또한 한전 전기 및 복합시스템으로부터 생산된 전기의 총 사용량을 측정하기 위해 AC 전력량계가 추가적으로 설비되었으며, 제원은 표[3-5]와 같다.



(a) DC 전력량계



(b) AC 전력량계

[그림 3-4] 전력량계

[표 3-4] AC 전력량계

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

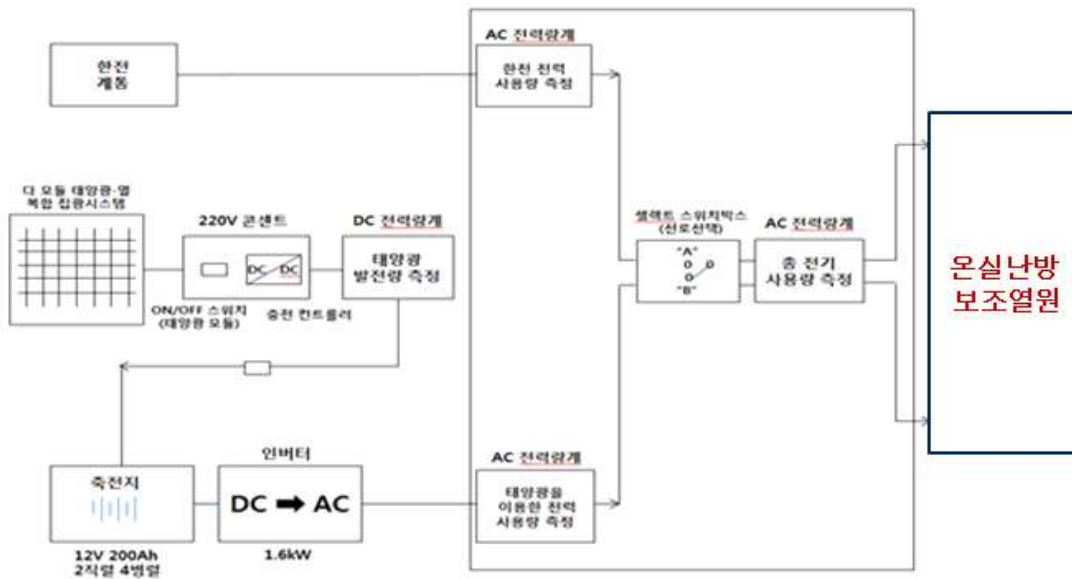
[표 3-5] AC 전력량계

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 [그림 3-5]와 같다. 전기 계통도에서와 같이 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.



[그림 3-5] 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 전기 계통도.

(2) 열매체 축열 및 순환설비

(가) 축열조

본 실험에서 사용한 축열조(KNPE500-001, 강남태양열, 한국)의 총 용량은 500 ℓ 이다. 다 모듈 복합 집광시스템의 입구와 출구에 길이가 다른 2개의 축온저항체를 설치하여 집광시스템으로 순환하는 열매체(에틸렌글리콜 50% + 물 50%)의 평균온도를 측정하였고, 축열조 내부의 축열매체인 물의 온도측정을 위하여 상·중·하부에 온도센서 각각 1개씩을 설치하였다. 또한 축열된 물은 축열조로부터 가온을 위해 온실 내에 설치된 라디에이터를 순환하여 다시 축열조로 유입되며, 라디에이터 입구 및 출구에 각각 2개식의 축온저항체 설치하여 축열매체 온도를 측정하였다. 온실 내에 설치된 축열조의 실물은 [그림 3-5]와 같다.



[그림 3-5] 온실 내에 설비된 축열조

(나) 열매체 저장탱크 및 질소압력탱크

온실 내에 설비된 열매체 저장탱크는 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 흡수기와 축열조 내의 열교환기를 순환하는 열매체를 보관 및 보충하는 역할하며[그림 3-6 (a)], 질소압력탱크(MAXIVAREM LS, VAREM, Italy)는 열매체에 질소 압력을 가해 열매체 순환을 용이하게 한다[그림 3-6 (b)]. 저장탱크에 담긴 열매체는 질소압력탱크를 거쳐 순환펌프를 통하여 복합시스템의 흡수기와 축열조 내의 열교환기를 순환하며 집광부의 CPV셀을 냉각시키고 축열조 내의 열 교환기를 통하여 복합 집광시스템에서 집광된 열매체의 열을 축열조 내의 축열매체인 물로 전달한다.



(a) 열매체 저장탱크



(b) 열매체 순환탱크와 연결된 질소압력탱크
[그림 3-6] 열매체 순환탱크

(다) 순환펌프

순환펌프(PH-080M, 일로펌프(주), 한국)는 질소압력탱크를 통과한 열매체를 복합 시스템의 흡수기로 강제 순환시키며, 축열조 내의 축열매체인 물을 온실 내의 열교환기로 강제 순환시키는데 사용된다[그림 3-7].



[그림 3-7] 순환펌프.

(사) 라디에이터

온실 난방을 위해 알루미늄 난방용 라디에이터(AR600, (주)지스타기업, 한국)를 온실 내의 양측에 각각 1개씩 설치하여 축열조 내의 온수를 순환시켜 온실 내의 공기를 가온하도록 하였다[그림 3-8].



[그림 3-8] 라디에이터

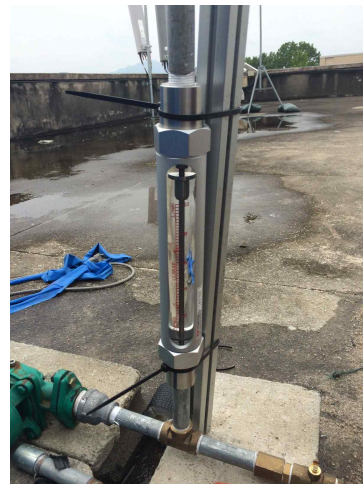
(아) 유량계

다 모듈 복합시스템을 순환하는 열매체의 유량을 조절할 수 있도록 복합시스템의 흡수기로부터 축열조로의 열매체 유입부에 유량계를 설치하였다. 또한 온실 난방을 위해 온실 내의 열교환기를 순환하는 축열조 내의 축열매체 유량을 측정하기 위해

축열조로의 축열매체 유입부에 유량계를 설치하였다. 설치된 유량계의 제원과 실물은 각각 [표 3-6] 및 [그림 3-9]과 같으며, 유량측정 범위는 1~10 l/min으로 본 연구에 사용하기에 적절하였다.

[표 3-6] 유량계 제원

Model	P-1407308-2
Measured fluid	Gas and Liquid
Range ability	10 : 1
Press. range	Max. 10 kgf/cm ² .G
Temp. range	Max. 120 °C
Allowable Thermal Shock	Max. 80 °C
Accuracy	±2 % F.S



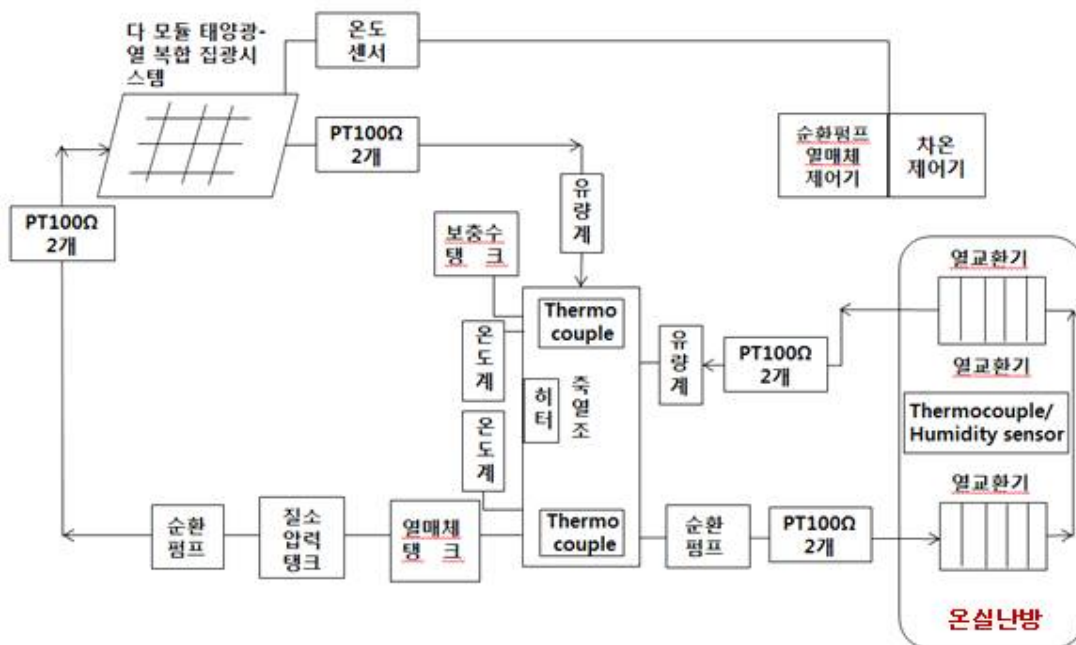
[그림 3-9] 유량계

(자) 열매체 및 축열매체 순환 계통도

[그림 3-10]은 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 열매체 및 축열매체 순환 계통도이며, 크게 복합시스템과 축열조 내의 열교환기를 순환하는 열매체와 축열조로부터 라디에이터를 순환하는 축열매체로 나눌 수 있다.

다 모듈 태양광-열 복합시스템을 순환하는 열매체는 열매체 저장탱크로부터 질소 압력탱크, 순환펌프, 태양광-열 복합시스템 내의 흡수기 그리고 유량계를 거쳐 축열조 내의 열교환기를 거쳐 열매체 저장탱크로 순환한다. 여기서 축열조 내의 안쪽벽면을 따라 나선형으로 설치된 열교환기를 순환하는 열매체는 축열조 내에 저장되어 있는 축열매체에 열을 전달하여 태양열 축열이 이루어진다. 여기서 겨울철 결빙방지를 위해 열매체로 물 혼합 에틸렌글리콜(에틸렌글리콜 50% + 물 50%)을 사용하였다. 또한 태양광-열 복합시스템의 흡수기 내 입·출구에 PT100Ω 2개식을 설치하

여 열매체의 입·출구 온도를 분석하였다. 열매체 입구 부분의 흡수기 표면에는 온도 센서를 부착하여 50℃가 되었을 때 열매체가 순환하며, 그 이하의 온도에서는 열매체 순환이 정지되도록 제어장치를 설비하였다. 태양광-열 복합시스템의 흡수기를 순환하는 열매체 유량 측정을 위해 축열조 입구에 유량계를 설비하였다. 축열조의 상·중·하 부에는 PT100Ω을 각각 한 개씩 설치하여 축열조 내부의 축열매체 온도를 측정하였다. 온실 난방을 위해 축열조 내에 축열된 축열매체는 순환펌프를 거쳐 온실 내의 2개로 구성된 라디에이터를 순환한 후 축열조로 다시 유입되며, 라디에이터의 입구와 출구 쪽에 각각 PT100Ω 2개씩을 설치하여 축열매체의 입·출구 온도차를 측정하였다.

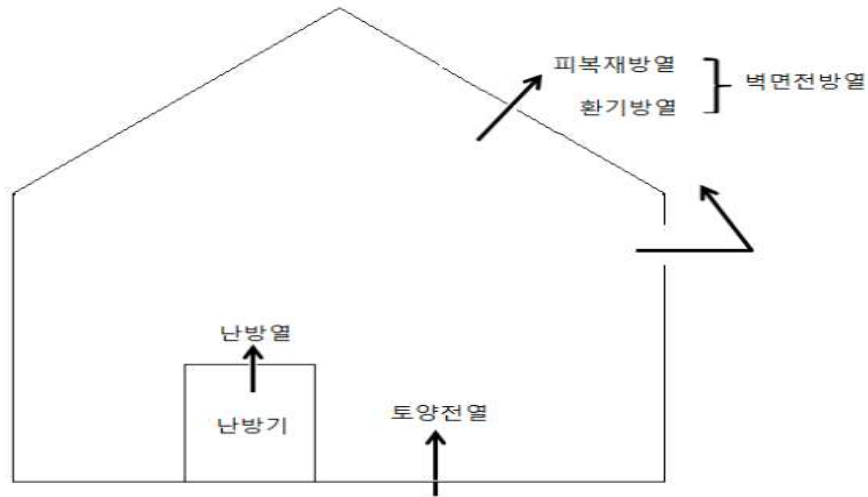


[그림 3-10] 태양광-열 복합시스템의 열매체 및 축열매체 순환 계통도.

(3) 실증실험용 온실 설계 및 설비

(가) 최대난방부하 결정

재배기간 중 야간 최저 외기온에 대비한 난방설비가 최대 규모로 될 것이며, 이 규모를 결정하는 지표가 최대난방부하가 된다. 야간에는 작물의 물리적 활동이 최소화되어 농작물에서 일어나는 현열과 잠열이 아주 작은 양이 되므로 이 경우의 난방온실의 열평형은 작물에서 발생하는 현열과 잠열을 생략한 경우로서 [그림 3-11]과 같이 표현할 수 있다.



[그림 3-11] 난방부하결정을 위한 야간 난방온실의 열평형도

최대난방부하를 구하는 데는 두 가지 방법이 있으며, 그 하나는 피복재방열, 환기방열과 토양전열을 각각 산출하여 합하는 분석적 방법이며, 다른 하나는 3개의 방열량을 일괄하여 종합적으로 계산하는 계략적 방법이 있다(송현갑외 5인, 1993). 본 연구에서는 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실난방 실증 실험을 위한 온실의 크기를 결정하기 위해 분석적 방법을 사용하였다.

① 피복재 방열량

피복재를 통과한 방열량은 온실 내에서 복사와 대류로 피복재 내표면에 전열되고, 다시 피복재의 얇은 막을 전도하여 피복재 외표면에 도달한 후에 외표면으로부터 복사와 대류를 통하여 외기 중으로 방열된다. 이와 같은 전열과정에서 얻어지는 전열전달계수를 h_t 로 하면 피복재 방열에 관한 식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{q_t}{A_g} = h_t(T_{in} - T_{out})(1 - f_r) \quad (3-1)$$

여기서, q_t : 전열전달량(kcal/hr)

h_t : 피복재의 전열전달계수(kcal/m²·hr·°C)

T_{in} : 설정실내기온(K)

T_{out} : 설계외기온(K)

피복재의 전열전달계수, h_t 는 피복재의 방사특성에 의하여 큰 영향을 받으며, 피복재별 h_t 는 [표 3-7]과 같고, 보온피복의 열절감률, f_r 는 [표 3-8]과 같다.

[표 3-7] 피복재별 전열전달계수, h_t

피복재	h_t (kcal/m ² ·hr·°C)
유리, 합성수지판 (FRP, FRA, MMA)	5.0
염화비닐필름	5.5
폴리에틸렌필름	5.8

[표 3-8] 보온피복에 의한 열절감률, f_r

보온방법	보온피복재	열절감률, f_r	
		유리온실	비닐온실
이중피복	유리, 염화비닐필름	0.40	0.45
	폴리에틸렌필름	0.35	0.40
한겹보온막	폴리에틸렌필름,	0.30	0.35
	염화비닐필름,	0.35	0.40
	부직포	0.25	0.30
	Al 분말혼합필름	0.40	0.45
두겹보온막	Al 증착필름, Al 박폴리에틸렌	0.50	0.55
	폴리에틸렌필름	0.45	0.45
	폴리에틸렌필름 + Al 증착필름	0.65	0.65
외면피복	Al 박폴리에틸렌필름		
	온실용 짚으로 만든 거적	0.60	0.65

② 환기전열량

온실피복면에는 여러 가지 틈새가 존재하며 이를 통하여 내외공기가 교환된다. 이때 실 내·외 엔탈피 차는 환기량에 영향을 받게 되며, 여기서 생기는 엔탈피 차로 환기에 의한 열손실을 산정할 수 있으나 보다 간편하게 하기 위하여 환기열전달계수의 개념을 도입하여 다음과 같은 간편한 식을 난방설계에 사용하고 있다.

$$\frac{q_v}{A_g} = h_v(T_{in} - T_{out}) \quad (3-2)$$

여기서, q_v : 환기열전달량(kcal/hr)

h_v : 환기열전달계수(kcal/m²·hr·°C)

A_g : 온실 표면적(m²)

온실구조와 종류에 따라 h_v 가 결정되며, 실외 풍속이 미풍인 경우 실험 및 경험 값은 [표 3-9]와 같다.

[표 3-9] 환기열전달계수

온실의 종류	h_v (kcal/m ² · hr · °C)
유 리 온 실	0.3~0.5
비 닐 온 실	0.2~0.4
보온피복을 한 온실	0.0~0.2
완 전 기 밀 온 실	0.0

③ 토양전열량

온실 내 토양상면 온도와 실온차에 의하여 토양 내 전열현상이 일어난다. 이 현상을 토양전열이라고 하며, 주간에 저장된 태양열 때문에 야간의 토양전열은 보통 토양 내부에서 토양표면으로 상향 전달된다. 난방온실의 경우에는 야간에도 실온이 높기 때문에 상향전열현상이 억제되는 경향이 있다. 난방부하를 증가시키는 하향전열을 양(+)으로 하고 난방부하를 감소시키는 상향전열을 음(-)으로 하여 온실 내·외 기온차에 의한 토양전열량을 나타내면 [표 3-10]과 같다.

[표 3-10] 온실 내의 단위면적당 토양전열량, q_{soil}/A_s (kcal/m²·hr)

실내·외 온도차	보온피복	있음	있음
	지방별	중부지방	남부지방
10°C		-10	-13
15°C		- 2	- 8
20°C		9	7

④ 최대난방부하 수식

피복방열, 환기방열과 토양전열량을 고려하여 설정실온을 유지시키는 데 필요한 열량이 난방부하가 되므로, 최대난방부하를 산정하는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$q_g = \left\{ q_t + q_v + A_g \times \frac{q_{soil}}{A_s} \right\} f_w \quad (3-3)$$

여기서, q_g : 최대난방부하(Kcal/hr)

A_s : 온실 내 상면적(m²)

q_{soil} : 토양전열량(kcal/hr)

f_w : 풍속에 의한 보정계수

우리나라 기상상태에서 최저기온이 일반적으로 미풍에서 나타나는지, 강풍에서 나타나는지를 분석할 필요가 있다. 왜냐하면 실내·외 기온차가 같은 경우 15 ~ 20 m/s의 풍속에서는 난방부하가 무풍시보다 배가 되기 때문이다. 미풍시에 최저기온이 나타나는 것으로 보면 $f_w \approx 1.0 \sim 1.1$ 이 된다. 식 (3-3)에 식 (3-1)과 식 (3-2)를 대입함으로써 최대난방부하식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q_g = A_g \left[\{h_t(1-f_r) + h_v\} (T_{in} - T_{out}) + \frac{q_{soil}}{A_s} \right] \times f_w \quad (3-4)$$

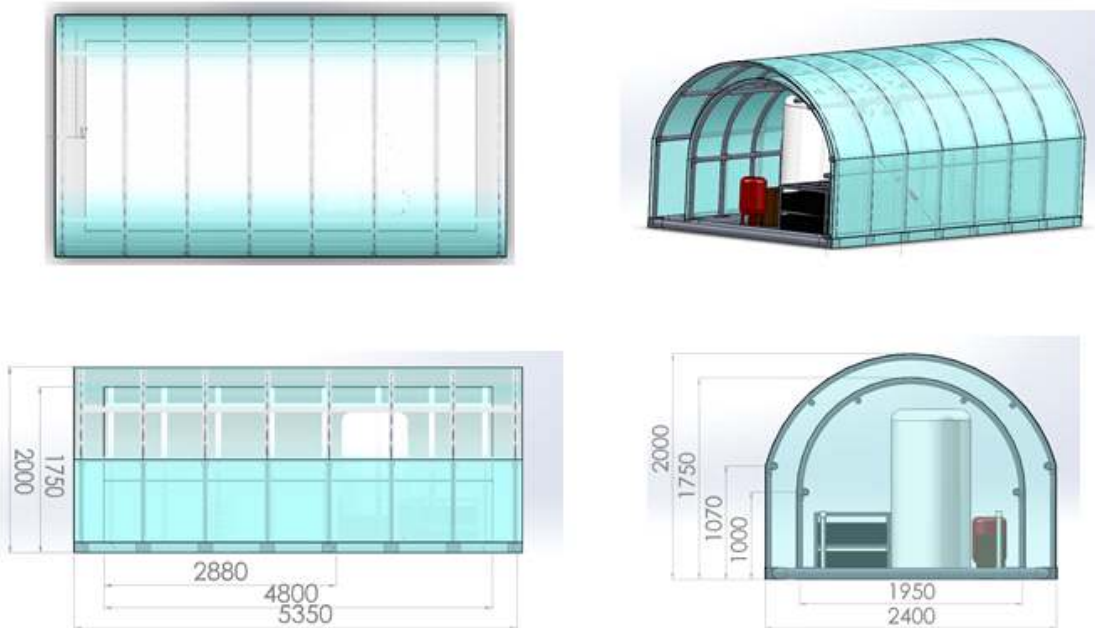
(나) 온실 표면적 산정

온실 난방을 위한 기간은 11월부터 다음해 3월까지 5달로 가정하였으며, 분석적 방법에 의한 온실 크기를 산정하기 위해 식 (3-4)을 이용하였다. 본 연구에서는 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 난방가능 열량을 2014년 2월에 측정한 직달일사량, 686.1 W/m^2 을 기준으로하다. 본 연구에서 제작된 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 집열면적은 3.6864m^2 이고, 열매체 유량 6 l/min 에서 합산효율(집열효율+발전효율)은 86%이다. 따라서 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 최대난방부하(q_g)는 1864.41 Kcal/hr 이다. 피복재별 전열전달계수, h_t 는 폴리에틸렌필름에 대해 5.8(표 3-7)이고, 보온피복에 의한 열절감률, f_r 은 비닐온실의 이중피복 폴리에틸렌필름이 0.4이다(표 3-8). 또한 환기열전달계수 $h_v(\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ 는 비닐피복이 0.2~0.4로 본 연구에서는 0.3을 취하였고, 설정실내기온(K)와 설계외기온(K)의 온도차($T_{in} - T_{out}$)를 20°C 로 가정하였고, 온실 내의 단위면적당 토양전열량, q_{soil}/A_s ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$)은 중부지방에 대해 9의 값을 사용하였다(표 3-10). 풍속에 의한 보정계수(f_w)는 미풍 시에 최저기온이 나타나는 것으로 보고 $f_w = 1.0$ 으로 가정하였다. 따라서 식 (3-4)식을 이용해 분석한 결과 본 연구에서 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 난방가능 온실 표면적(A_g)은 22.0m^2 으로 나타났고, 이 값을 온실설계 기준으로 사용하였다.

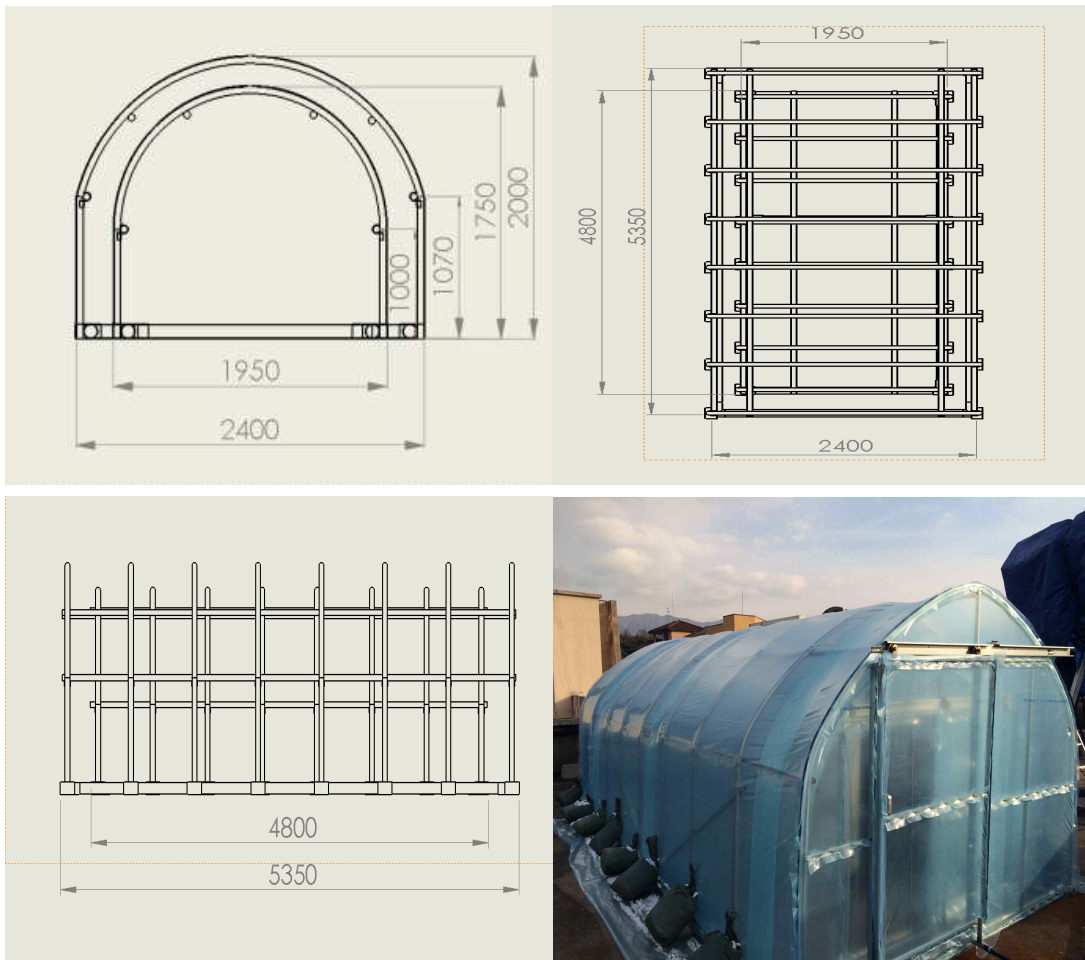
(다) 실증실험용 온실설비

온실의 종류별 표준내구연수는 유리온실이 20년, 플라스틱온실 10 ~ 20년, 파이프하우스 5년이며, 고정하중(시설구조물, 피복재, 개폐장치 등), 풍하중, 적설하중, 장치하중, 작물하중을 고려하여 온실을 설계한다.

온실난방 실험을 위해 설치한 온실은 이중 아치형으로 열 손실을 최소화하기 위하여 내부와 외부에 이중으로 설치하였다. 온실의 구조재는 아연용융도금강관을 사용하였으며, 피복재로는 폴리에틸렌 필름을 사용하여 제작하였다. 온실의 크기는 내부 온실 1,950mm×4,800mm×1,750mm과 외부 온실 2,400mm×5,350mm×2,000mm의 이중으로 제작하였으며 하우스 내의 한쪽 끝은 축열조와 축전지, 열매체탱크, 질소압력탱크 등을 설비할 수 있도록 난방을 위한 온실과 폴리에틸렌 비닐로 막아 분리하였다. 따라서 난방을 위한 온실의 크기는 내부 온실기준으로 온실 표면적(A_g)이 21.47m²으로 제작하여, 설계기준인 22.00m²을 충족하도록 하였다. 부가시설 설비 공간을 포함한 온실의 개략도는 [그림 3-12]와 같으며, 온실 도면과 실물은 [그림 3-13]과 같다.



[그림 3-12] 부가시설 설비 공간을 포함한 온실의 개략도.



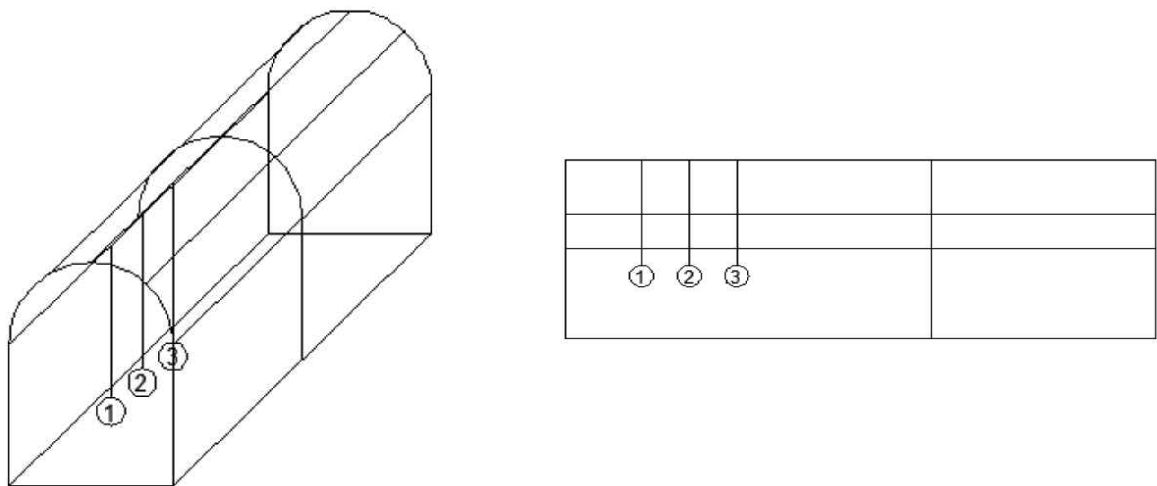
[그림3-13] 온실의 도면 및 실물.

(4) 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실난방 실험설비 구성

다 모듈 복합시스템의 흡수기와 축열조를 연결하는 열매체 순환 배관은 5cm 두께의 우레탄 폼으로 완전히 단열되었고, 열매체 유량은 시스템 합산효율이 가장 우수한 6ℓ/min로 고정하였다. 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실 난방실험은 2015년 2월부터 4월 사이에 진행되었다. 다 모듈 복합시스템의 가동은 주간에 이루어고, 주간에 축열되는 태양 복사열은 축열조에 저장되고 발전된 전기는 축전지를 통해 난방 및 부대시설 가동에 이용된다. 축열매체의 온도는 항상 50℃를 유지하도록 설정되어 있고, 태양열에 의한 축열매체의 열량이 부족할 시에는 축열조 내 보조히터가 가동되도록 설비되어 있다. 온실 내의 온도는 15℃로 설정되었고, 설정온도에 따라 축열매체는 온실 내에 설비된 라디에이터의 순환이 제어된다.

축열매체의 온도측정은 축열조 내 상, 중, 하에서 이루어졌고, 외기온도 및 일사량이 측정되었다. 온실 내 온도 및 습도계측은 온실의 중간 정도 높이에서, 전방, 중간, 후방의 세 지점에서 계측하였고, 분석을 위해 평균하였다[그림 3-14]. 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실 난방을 실험설비는 [그림 3-15]와 같다.

축열조 및 온실 내 온도측정은 각각 3도선식 측온저항체(RTD : Resistance Temperature Detector) 센서 및 열전대(K type)를 데이터로거(GL800, GRAPHTE, USA)에 연결하여 온도 데이터를 수집하고 분석하였다. 또한 온실 내 상대습도는 USB 데이터로거(HE170)을 사용하여 측정하였다. 일사량은 일사량계(Pyranometer EQ-08, Middleton Solar, Australia)를 집광장치에 부착하여 태양을 추적하는 동안 법선면 전일사량을 측정하도록 하였으며, 일사량 자료는 데이터로거(KL-200, Wellbian system, Korea)를 사용하여 수집하였다. 또한 외기온도와 풍속 및 수평면 전일사량을 측정하기 위하여 기상관측장비(Wireless Vantag Pro2 Plus, Davis Instruments, USA)를 이용하였다.



[그림 3-14] 온실 내 온도 및 습도계측 장비 설비 위치



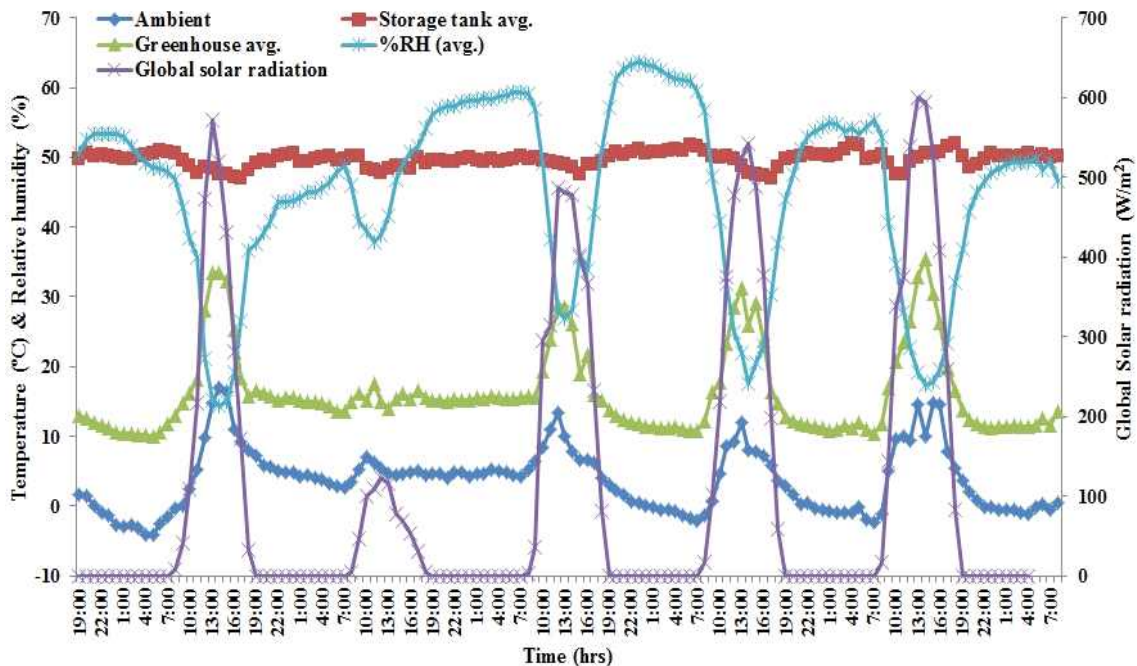
[그림 3-15] 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실 난방을 실험설비

2. 에너지 자립형 온실의 난방실험 결과 분석

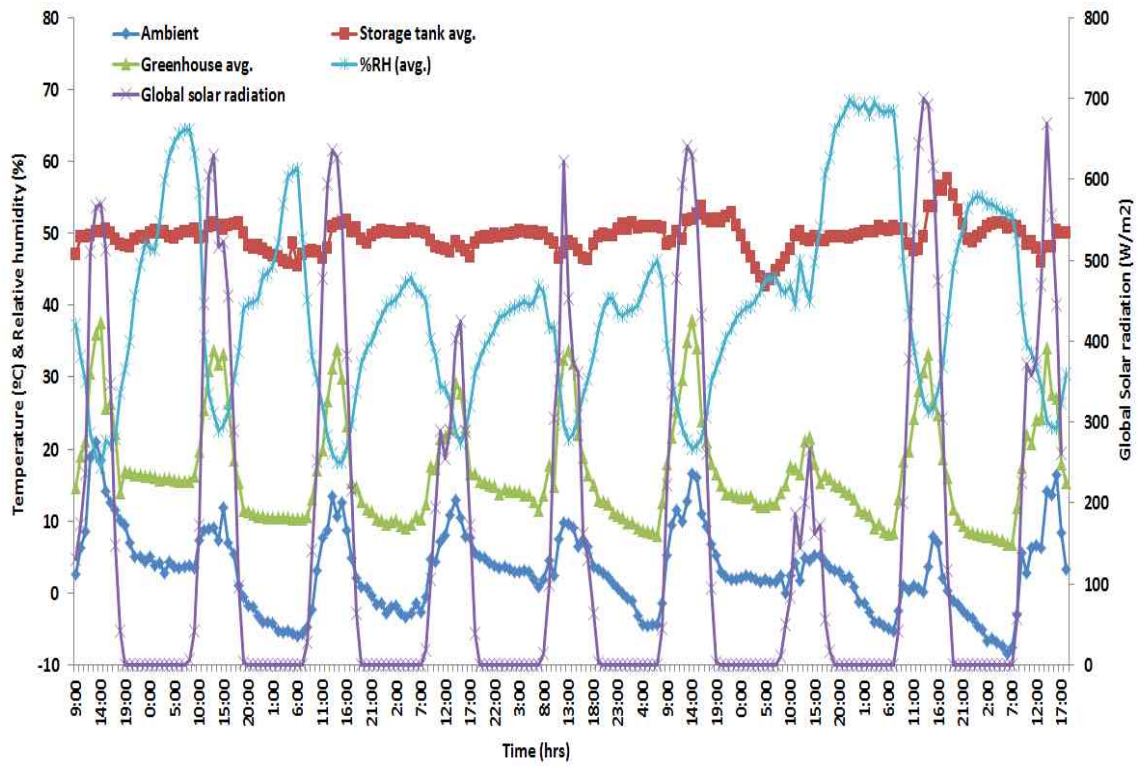
온실난방 실험은 2015년 2월부터 4월 사이에 8주간 수행되었으며, 대기온도, 일사량, 축열조 내 축열매체 온도, 온실 내의 3지점에서 온도 및 습도를 측정하여 평균하였다. 온실 난방실험을 시작한 2월 19일부터 3월 중순까지는 [그림 3-16] ~ [그림 3-19]에서 보이는 것과 같이 외기온이 영하로 떨어질 때의 온실 내 온습도 변화를 나타내고 있다. 외기의 최저기온은 해가 뜨기 전 오전 5시에서 7시 사이인 것으로 나타났다. 온실 내의 온도는 주간에 태양복사열의 영향으로 30℃ 내외로 상승하나, 야간에는 10 ~ 15℃에서 잘 유지됨을 나타내었다. 실험 전 기간 동안 축열조 내의 축열매체 온도는 대체적으로 45 ~ 55℃로 잘 유지됨을 나타내었다. 이는 축열조 내의 열매체가 일정한 온도 유지가 가능하도록 온도제어장치가 설비되어 있고, 필요시 다 모듈 복합시스템으로부터 축전지에 저장된 전기를 공급받아 축열조 내의 히터가 가동하도록 되어 있기 때문이다. 따라서 약 50℃로 유지되는 축열조 내 500ℓ의 축열매체 용량은 온실 표면적 21.47m²을 갖는 온실의

겨울철 난방에 적합한 것으로 나타났다. 일사량이 상대적으로 높은 기간의 온실 내 온도는 외기온이 영하로 떨어짐에도 불구하고 다소 높게 나타났다[그림 3-18]. 이는 일사량이 상대적으로 높았기 때문인 것으로 2월 26일부터 3월 5일의 실험기간 동안 외기온은 $-10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 로 다소 낮았으나, 일사량은 $0 \sim 740 \text{ W/m}^2$ 으로 다소 높았고, 따라서 온실 온도는 $10 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 로 주간에는 최고 40°C 까지 상승하였다. 온실내의 온도변화는 외기온도의 변화 경향과 유사하게 나타나고 있다. 즉 주간의 외기온이 높을 때 온실 내의 온도 또한 상승하고, 야간의 기온이 낮을 때는 반대로 온실 내의 온도는 하강하나 가온을 위해 온실 내의 열교환기로의 축열매체 순환으로 인해 온실 내의 온도는 대체로 10°C 이상을 잘 유지하였다.

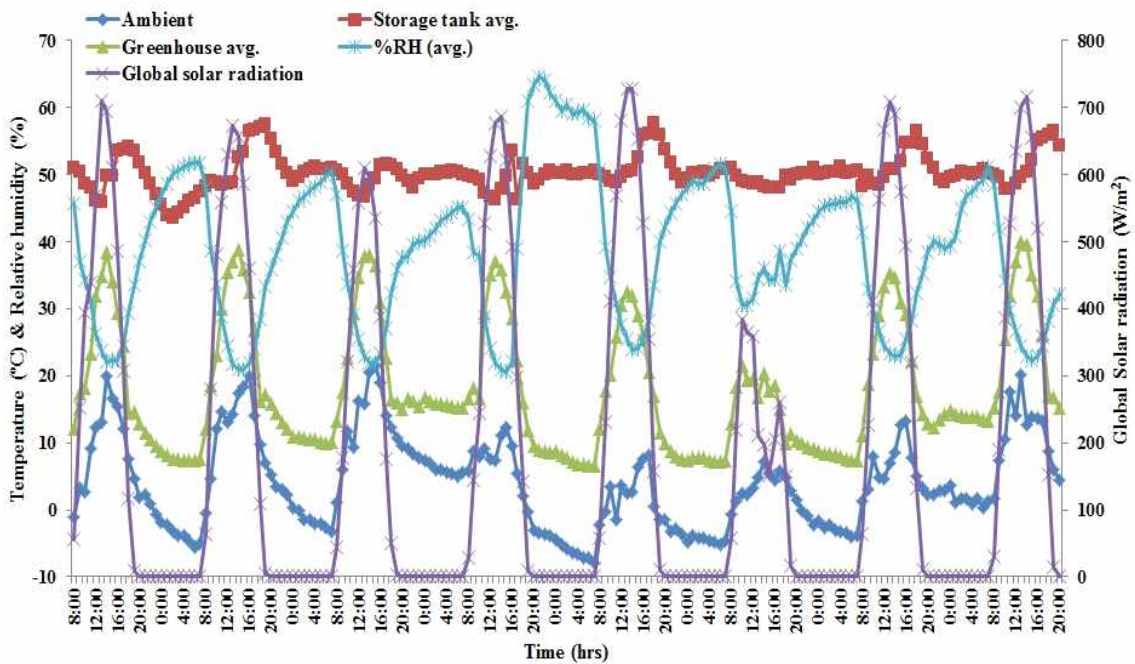
다소 낮은 외기온도를 갖는 온실 난방실험 기간 2월 19일부터 3월 중순까지는 [그림 3-16] ~ [그림 3-19]에서 보이는 것과 같이 온실 내의 상대습도는 최저 20%에서 최대 85%까지 변함을 나타내었으나, 평균적으로 약 40% 정도의 낮은 상대습도를 보였다. 특히 온실 내 온도가 낮은 야간에는 상대습도가 다소 높게 나타났고, 온실 내의 온도가 높은 주간에는 상대습도가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 즉, 주간의 온실 내 온도가 약 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 로 높을 때는 온실 내의 상대습도가 20 ~ 25%정도로 매우 낮게 나타났으나, 온실 내의 온도가 10°C 내외로 낮아질 경우는 온실 내의 상대습도가 60%이상으로 다소 높게 나타났다.



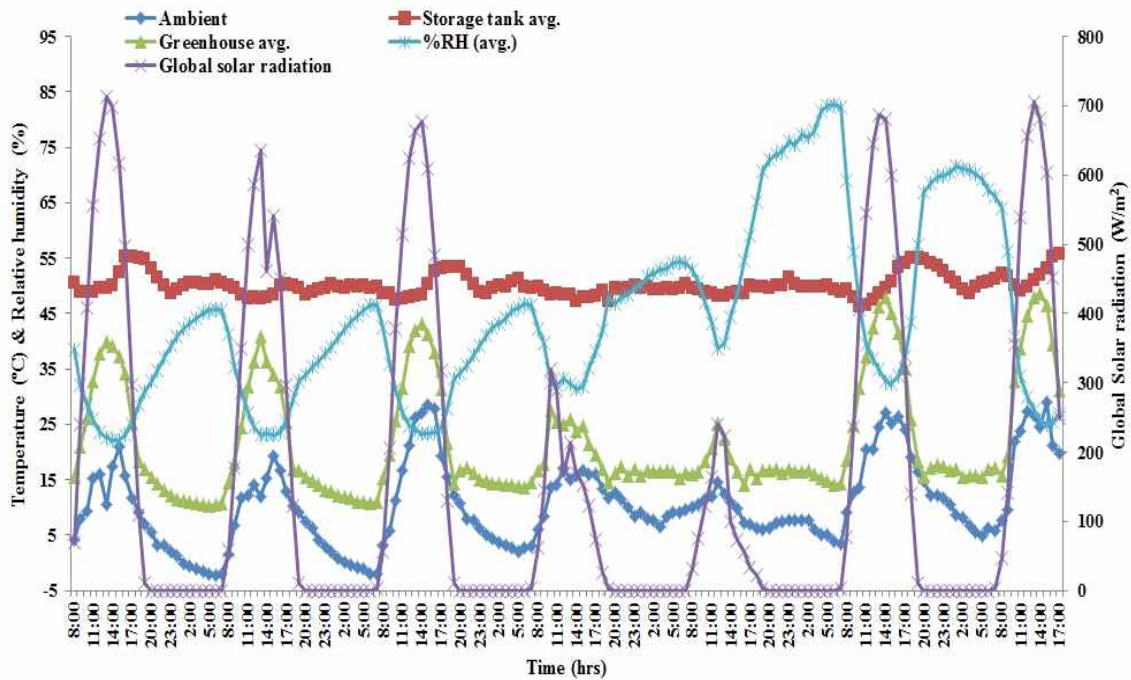
[그림 3-16] 실험기간 2월 19일부터 25일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화.



[그림 3-17] 실험기간 2월 26일부터 3월 5일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화.



[그림 3- 18] 실험기간 3월 6일부터 3월 13일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화.

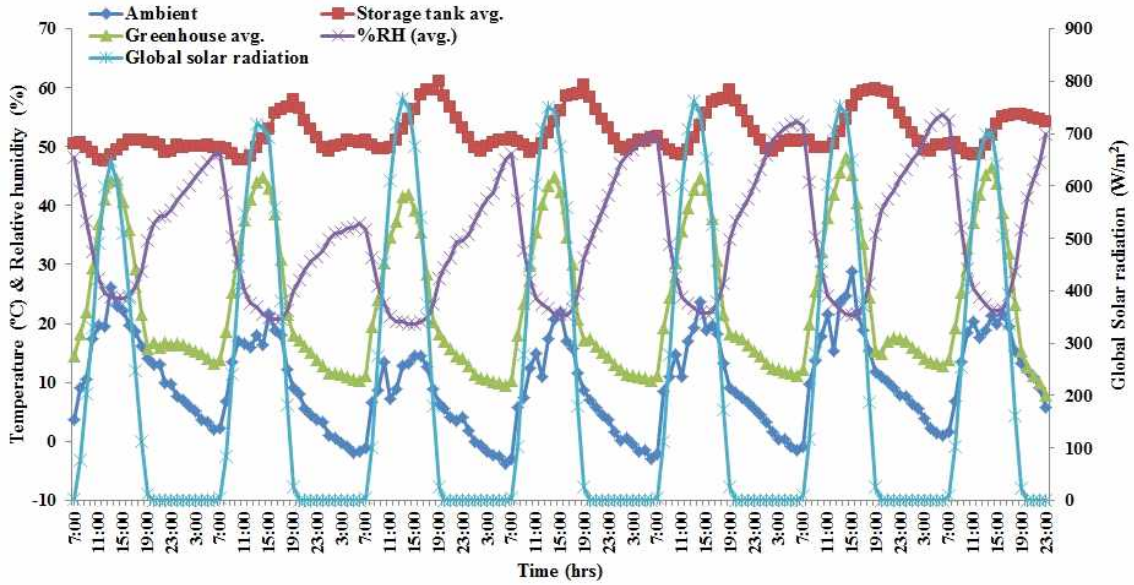


[그림 3- 19] 실험기간 3월 14일부터 3월 20일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화.

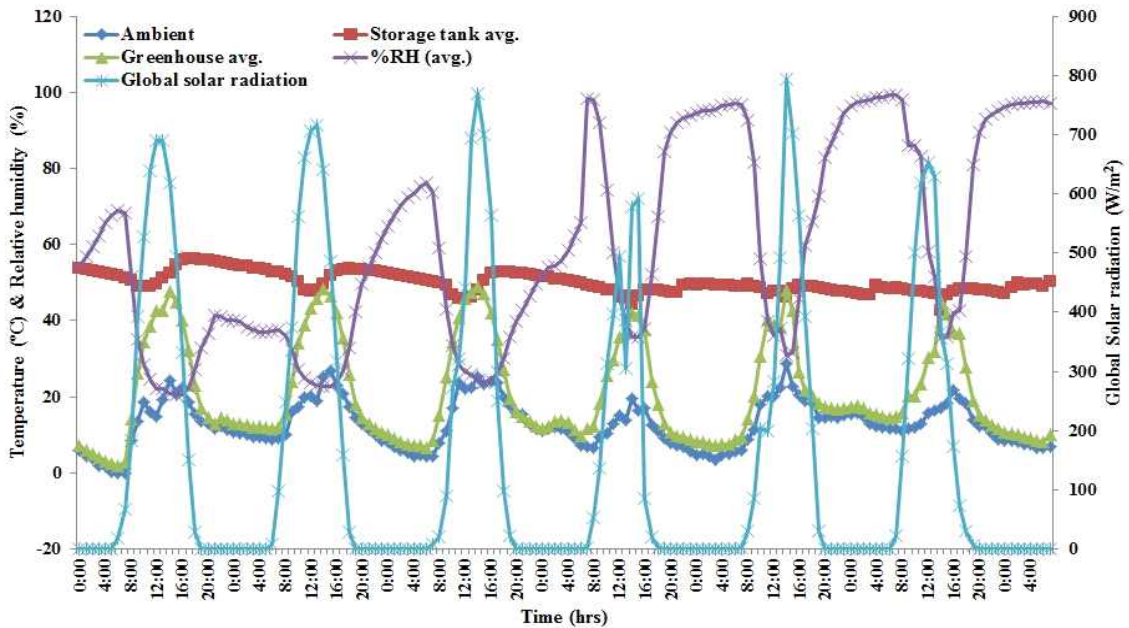
봄이 시작되는 다소 외기 온도가 상승한 실험기간인 3월 21일부터 4월 20일까지 수행된 온실난방 실험결과를 [그림 3-20] ~ [그림 3-23]에 나타내었다. 외기온도는 실험기간 3월 21일부터 28일 까지는 야간에 대체로 영하로 내려갔으나, 3월 29일부터 4월 20일까지의 실험기간 동안에는 야간에도 영상의 기온을 유지하였다 ([그림 3-20] ~ [그림 3-23]). 특히 이러한 실험기간 동안에는 주간의 외기 온도가 최고 20°C 이상 상승하는 날이 많았으나, 야간에는 10°C 이하로 내려가는 날이 대부분으로 난방의 필요성을 나타내었다. 또한 이러한 실험기간 동안에는 흐린 날을 제외하고는 일사량도 최고 700 W/m² 이상으로 높게 나타났다.

온실 내의 야간에 상대습도는 실험기간 3월 21일부터 28일 까지는 대체로 60% 이하의 낮은 값을 나타내었으나 [그림 20], 3월 19일부터 4월 20일까지의 실험기간 동안에는 야간의 상대습도가 대부분 80% 이상까지 상승하는 것으로 나타났다 ([그림 3-21] ~ [그림 3-23]). 이러한 실험기간 동안 온실 내의 상대습도가 높아진 것은 일상적으로 봄 및 가을철에 많이 나타나는 현상으로 온실 내의 온도와 외기의 온도차가 커져 온실 내 피복재에 응축현상이 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 3월 21일부터 28일까지의 실험기간 내내 맑을 날씨로 일사량이 일관적으로 유사한 크기를 나타내었으며, 야간의 온실 내 온도는 설정온도인 15°C 전후를 잘 유지함을 나타내었다 [그림 3-20]. 실험기간 후반부에는 흐린 날이 많아

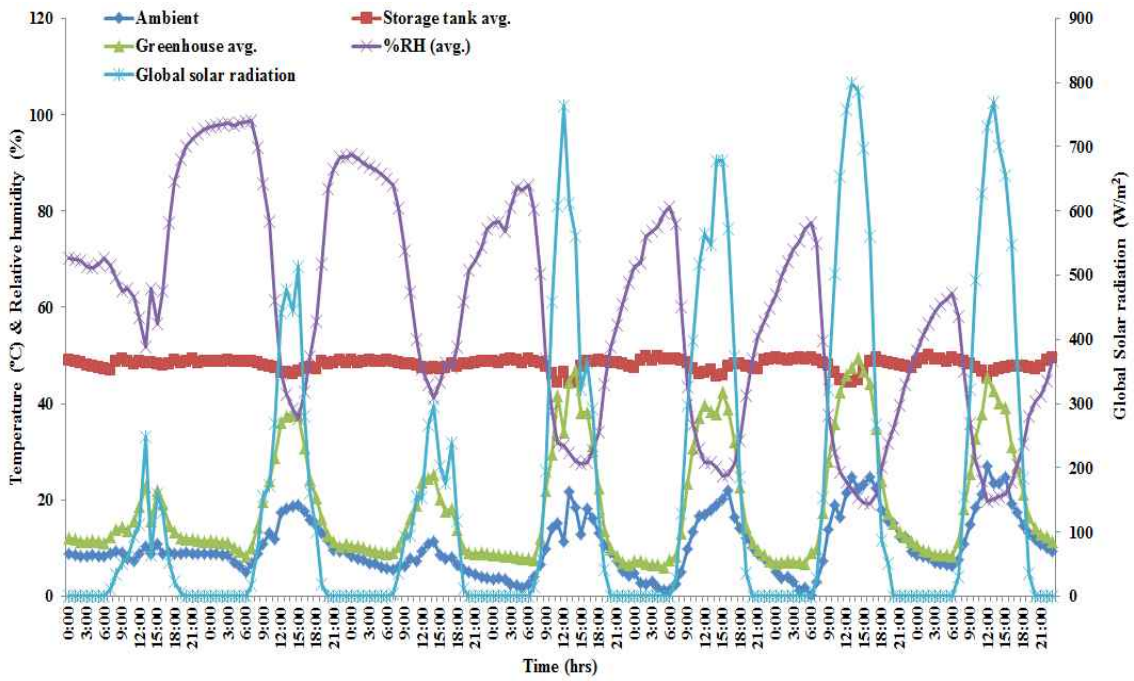
다소 날씨가 불안정하였으며, 기온이 높아져 온실 내의 온도가 상승하기도 하였으나, 온실 내의 온도는 대체로 10 ~ 15°C로 잘 유지되었다([그림 3-22] ~ [그림 3-23]). 따라서 온실난방 실증실험 결과로 볼 때 본 연구에서 개발한 다 모듈 복합시스템은 온실난방에 잘 적용될 수 있다고 판단된다.



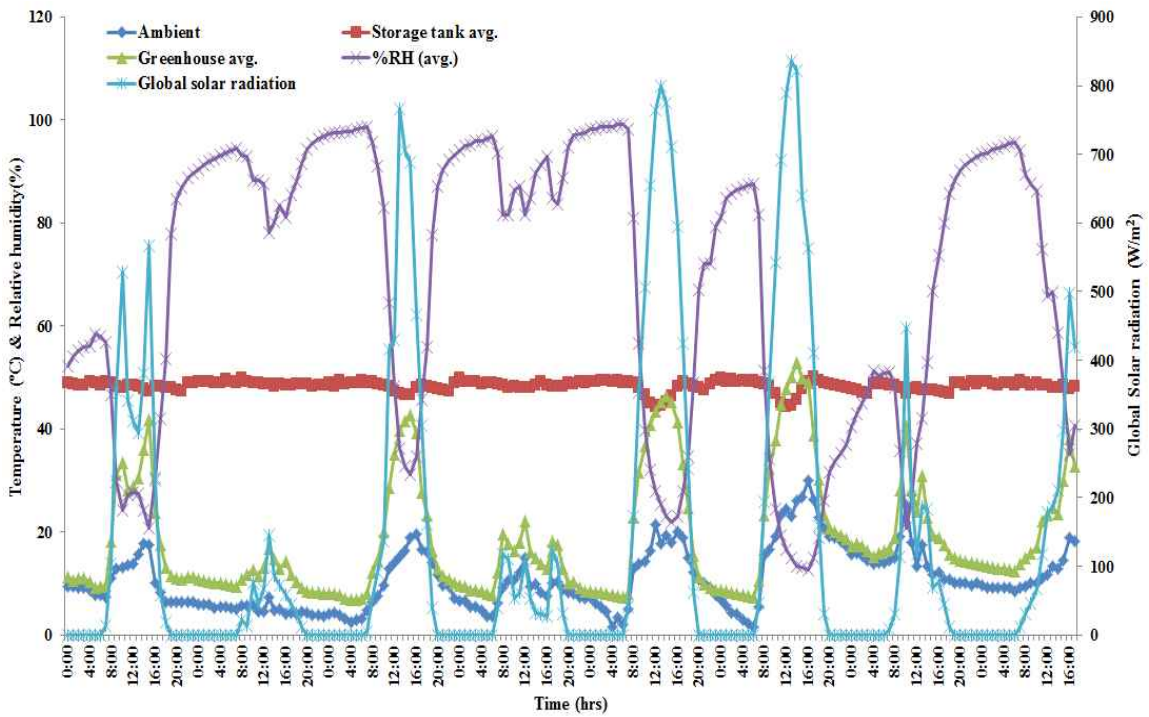
[그림 3-20] 실험기간 3월 21일부터 3월 28일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화



[그림 3-21] 실험기간 3월 29일부터 4월 4일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화



[그림 3-22] 실험기간 4월 5일부터 4월 12일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화



[그림 3-23] 실험기간 4월 13일부터 4월 20일까지의 외기온도, 축열조 축열매체 온도, 온실 내 온도, 상대습도 및 일사량 변화

3. 경제성 분석

(1) 경제성 평가 방법

온실 난방을 위한 다 모듈 복합 시스템의 경제성 분석 방법을 조사한 결과 비용 편익비, 순현재가치, 내부수익률, 분석 프로그램 RETScreen, HOMER 등이 있으며, 특징은 다음과 같다.

(가) 비용편익비 (Cost Benefit Ratio : CBR)

- 편익의 순현재가치와 비용의 순현재가치의 비를 구하여 경제적 채산성을 판단
- 자본의 기회비용을 적절히 반영하기 위해 각기 다른 시점에서 발생하게 되는 비용과 편익을 동일한 기준시점에서 상호비교가 가능하도록 하는 할인율의 선택이 중요
- 일반적으로 사용되는 할인율은 시장이자율, 기업할인율, 정부차입이자율, 사회적 할인율, 공공투자사업의 기준할인율 등이 존재

(나) 순현재가치 (Net Present Value : NPV)

- 프로젝트에 대한 편익의 순현재가치와 비용의 순현재가치의 차이에 의해 경제적 채산성을 판단
- 대안선택에 있어서 정확한 기준을 제시해 주고, 계산이 용이

(다) 내부수익률 (Internal Rate of Return : IRR)

- 편익과 비용의 현재가치의 차이, 즉 순현재가치를 0으로 만드는 할인율
- 비용을 사업내용 기간 내에 회수함과 동시에 수익을 창출하는 비용의 채득력을 의미
- 편익과 비용의 현재가치의 차이가 0이 되는 할인율이 사회적 기회비용보다 높을 경우 사업의 수익성이 있다고 보는 기준

(라) RETScreen

- 풍력, 태양광 등 시스템의 에너지 생산량, life-time cost, 온실가스 방출량 평가
- 개발: 캐나다, Renewable Energy Decision Support Center
- 분석결과: 프로젝트의 타당성 조사, 설비구매 및 설치비용, 유지보수 비용

(마) HOMER

- 도서지역에 송전선로의 손실을 배제하기 위해 풍력, 태양광 등을 채택하여 도서지역에 단독으로 운영되는 hybrid power system의 최적 설계 및 운영을 위한 simulation 프로그램
- 개발: 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)
- 분석결과: 시스템의 구성과 각 경우별 NPV(Net Present Value) 등이 표시

(2) 온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성 평가

본 연구에서 개발된 온실 난방을 위한 다 모듈 태양광-열 복합시스템의 유류 대비 에너지 경제성분석을 위해 난방기간을 11월부터 다음해 3월까지 5개월로 가정하고 투자 자금 회수기간 및 타당성에 대한 분석을 수행하였다. 다 모듈 복합시스템의 경제성 분석은 태양광 발전에 대해 계통연계형과 분리독립형으로 나누어 수행하였다. 분리독립형은 계통연계형이 어려운 지역이나 전기 시설이 미비한 곳에 사용하기 위한 시스템으로 축전지, 인버터 등 추가 시설비용이 소요되며 두 시스템 모두 총 발전량에 대해 유류의 단가에 맞춰 수익성을 계산하였다.

본 연구에서 온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성 분석은 정태적 경제성 평가 방법의 순현재가치법(NPV)을 사용하였다. 순현재가치법(NPV)은 적용이 간편하며 의사결정에 왜곡이 적다는 장점을 가지고 있다. 순현재가치(NPV)는 다음의 식 (3-5)와 같이 구성된다.

$$NPV = \sum_{i=0}^n \left[\frac{B(i) + GHG(i)}{(1+r)^i} \right] - \left[C_0 + \sum_{i=0}^n \frac{OM(i)}{(1+r)^i} \right] \quad (3-5)$$

여기서

- $B(i)$: 에너지 판매수입
- $GHG(i)$: 연간 온실가스 배출 저감에 따른 배출권 수입
- C_0 : 초기투자비
- $OM(i)$: 연간 유지보수(O&M)비용
- r : 할인율
- n : 설비 운용기간

(가) 평가 대상 시스템

경제성 분석에 적용된 온실난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 체원은 다음과 같이 계통연계형과 분리독립형으로 구분하였다.

[표 3-11] 경제성분석을 위한 평가 시스템 구성

시스템 구성	
다 모듈 복합시스템 (태양광+태양열)	계통연계형 분리독립형
설비 내구 년 : 20년	
시스템 효율 : 86%	태양광: 25%, 태양열: 61%
집광 면적 : 3.69 m ²	

(나) 기상자료 및 에너지 생산량

법선면 직달일사량은 2014년 11월부터 2015년 3월까지 강원도 춘천시 강원대학길1, 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상에서 측정한 실측 자료를 토대로 다음의 식(8-6)에 의해 태양광 발전에 의한 에너지 생산량을 계산하고, [표 3-12]에 나타내었다.

$$Q = Total_{rad} \times E_{vol} \times A \quad (3-6)$$

여기서

Q = 에너지 생산량(kcal)

Total_{rad} = 수집된 총 직달일사량(kcal/m²)

E_{vol} = 다 모듈 복합시스템 태양광 발전효율(%)

A = 다 모듈 복합시스템 집광 면적(m²)

[표 3-12] 태양광 발전 에너지 생산량

기간	법선면 직달일사량		효율(%)	에너지 생산량(kcal)
	W/m ²	kcal/m ²		
2014.11.1 ~ 2015. 03.31	686.10	2,117,108.57	25	1,951,127.26

또한 태양광 집열에 의한 에너지 생산량은 식(8-7)에 의해 계산하였고, [표 3-13]에 나타내었다.

$$Q = Total_{rad} \times E_{thermal} \times A \quad (3-7)$$

여기서

Total_{rad} = 수집된 총 직달일사량(kcal/m²)

E_{thermal} = 다 모듈 복합시스템 태양열 효율(%)

A = 다 모듈 복합시스템의 집광면적(m²)

[표 3-13] 태양열 에너지 생산량

기간	법선면 직달일사량		효율(%)	에너지 생산량(kcal)
	W/m ²	kcal/m ²		
2014.11.1 ~ 2015. 03.31	686.10	2,117,108.57	61	4,760,750.51

(다) 설비비용

복합시스템의 계통연계형, 분리 독립형으로 분류하였으며, 요구되는 항목 및 비용은 [표 3-14]와 같다.

[표 3-14] 복합시스템 분류의 따른 설비비용

계통연계형			분리독립형		
구분	설비비(원)		구분	설비비(원)	
프레넬 렌즈	600,000	8%	프레넬 렌즈	600,000	6%
CPV 셀	2,700,000	36%	CPV 셀	2,700,000	27%
축열조	600,000	8%	축열조	600,000	6%
태양 추적장치	2,000,000	27%	태양 추적장치	2,000,000	20%
펌프 2개	400,000	5%	펌프 2개	400,000	4%
프레임 및 배관시설	500,000	7%	프레임 및 배관시설	500,000	5%
질소압력탱크	300,000	4%	질소압력탱크	300,000	3%
열매체 저장 탱크	100,000	1%	열매체 저장 탱크	100,000	1%
유량계	100,000	1%	유량계	100,000	1%
온도 센서	200,000	3%	온도 센서	200,000	2%
			충전 컨트롤러	750,000	8%
			인버터	250,000	3%
			배터리	1,500,000	15%
총:	7,500,000	100%	총:	10,000,000	100%

(라) 경제성 분석 기본자료

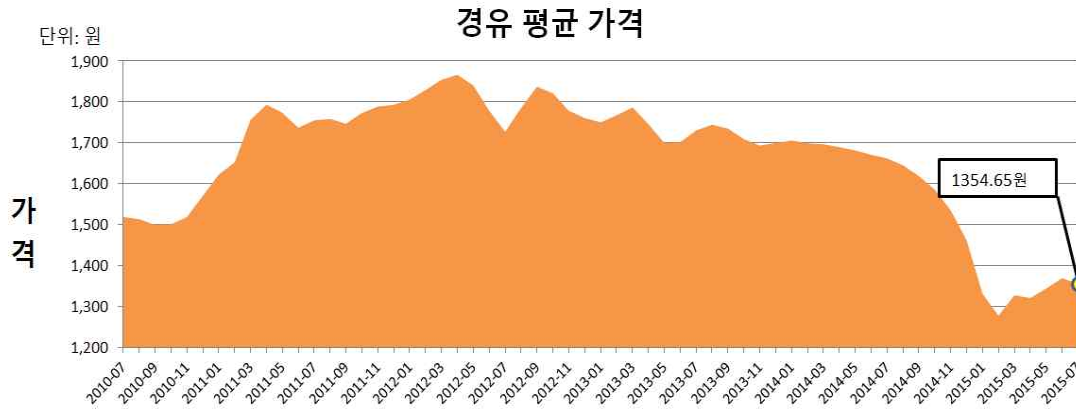
온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성 평가를 위해 요구되는 시설투자비, 사업기간, 보조율, 에너지생산 수입, 할인율, 연간운영비의 입력 자료는 [표 3-15]와 같다.

[표 3-15] 경제성 분석 기본자료

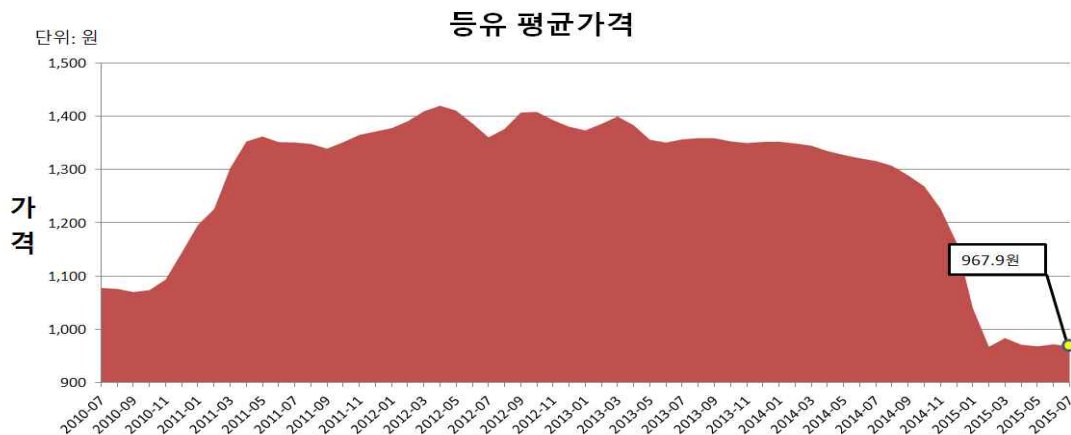
구분	기본자료
시설투자비	7,500천원(계통형)
	10,000천원(분리형)
평가 기간	20년
보조율	50%
에너지 생산수입 (등유): 2015년 7월 기준	725,858원 (967.90/L기준)
에너지 생산수입 (경유): 2015년 7월 기준	1,004,668원 (1354.65원/L기준)
할인율	5.5%
연간운영비	1%

(마) 적용 유류가격

우리나라의 경유 및 등유 가격은 2012년도에 각각 1,700원 및 1,300원을 상회하였으나, 2015년도에는 경유 및 등유 가격이 각각 1,400원 및 1,100원 이하로 하락한 상태이다([그림 3-24], [그림 3-25]). 본 연구에서 다 모듈 복합시스템의 연간 총 에너지 생산량을 면세유류가격으로 환산하여 경제성을 분석하기 위해 [표 3-16]와 같이 유류 가격이 매우 하락한 2015년 7월의 면세유류(경유 및 등유) 가격을 기준으로 하였다.



[그림 3-24] 경유 평균 가격 추이



[그림 3-25] 등유 평균 가격 추이

[표3-16] 유류가격 추이

*한국석유공사 Opinet 기준

날 짜	경 유(원)	등 유(원)
2010년07월	1,518.18	1,077.39
2010년09월	1,499.16	1,069.73
2010년11월	1,518.01	1,093.23
2011년01월	1,621.73	1,196.03
2011년03월	1,755.92	1,302.79
2011년05월	1,772.88	1,362.42
2011년07월	1,754.36	1,351.12
2011년09월	1,746.28	1,339.58
2011년11월	1,788.03	1,365.43
2012년01월	1,805.14	1,378.07
2012년03월	1,853.55	1,409.77
2012년05월	1,839.61	1,411.04
2012년07월	1,726.59	1,360.80
2012년09월	1,836.55	1,407.41
2012년11월	1,777.65	1,393.19
2013년01월	1,749.59	1,373.84
2013년03월	1,785.96	1,399.99
2013년05월	1,699.44	1,356.16
2013년07월	1,729.69	1,356.93
2013년09월	1,734.29	1,359.26
2013년11월	1,692.86	1,350.13
2014년01월	1,705.09	1,352.66
2014년03월	1,696.03	1,345.04
2014년05월	1,680.90	1,327.66
2014년07월	1,661.47	1,316.23
2014년09월	1,618.07	1,289.12
2014년11월	1,534.25	1,227.02
2015년01월	1,330.47	1,039.71
2015년03월	1,326.82	983.17
2015년05월	1,343.53	967.66
2015년07월	1,354.65	967.9

(바) 온실가스 배출 저감에 따른 배출권 수익

온실가스 배출 저감에 따른 배출권 수익은 온실가스 배출권 거래 제도로써 유류와 같은 연료 연소시 배출되는 온실가스 배출권의 거래 수익을 나타낸다. 각 유류에 적용되어지는 IPCC 탄소 배출 계수는 [표 3-17]과 같으며, 본 다 모듈 복합시스템에 적용된 등유와 경유는 각각 0.812, 0.837 C Ton/TOE이다. 이산화탄소배출량(tCO₂)은 다음의 식(3-8)과 같이 계산한다.

$$\text{이산화탄소배출량(tCO}_2\text{)} = \text{탄소 배출 계수(C Ton/TOE)} \times \text{연료 소비량(L)} \quad (3-8)$$

여기서, 연료소비량(L)은 본 다 모듈 복합시스템의 에너지 생산량(Kcal)을 유류량(L)으로 환산한 값을 사용한다.

[표 3-17] IPCC 탄소 배출 계수 (Carbon Emission Factors) ❖ 에너지경제연구원

연료구분			탄소 배출 계수	
			C Kg/GJ	C Ton/TOE*
액체화석연료	1 차연료	원유	20.00	0.829
		천연액화가스	17.20	0.630
	2 차연료	휘발유	18.90	0.783
		Avi-Gas	18.90	0.783
		등유	19.60	0.812
		항공유	19.50	0.808
		경유	20.20	0.837
		중유	21.10	0.875
		LPG	17.20	0.713
		납사	20.00	0.829
		Bitumen	22.00	0.912
		윤활유	20.00	0.829
		PetroleumCoke	27.50	1.140
		RefineryFeedstock	20.00	0.829
고체화석연료	1 차연료	무연탄	26.80	1.100
		원료탄	25.80	1.059
		연료탄	25.80	1.059
		갈탄	27.60	1.132
		토탄	28.90	1.186
	2 차연료	BKB & Patent Fuel	25.80	1.059
		Coke	29.50	1.210
기체화석연료		LNG	15.30	0.637
바이오매스**		고체 바이오매스	29.90	1.252
		액체 바이오매스	20.00	0.837
		기체 바이오매스	30.60	1.281

* 에너지원별 IPCC Guideline에서 제시하고 있는 용도별 연소율 적용

** 임산연료 및 기타(바이오매스) 에너지원의 연소로 인한 CO2배출량은 국가 CO2배출

본 연구에서 다 모듈 복합시스템의 탄소 배출권 가격은 [표 3-18]과 같이 2015년 08월을 기준으로 적용하였으며, 연료별 배출권에 따른 수익은 각각 연간 18,849원(등유), 19,776원(경유)이다.

[표 3-18] 배출권 거래 가격

*KRX배출권거래시장

년-월	증가(원)
2015-08	10,300
2015-07	10,300
2015-06	10,300
2015-05	10,300
2015-04	10,100
2015-03	10,100
2015-02	9,960
2015-01	8,640

(사) 다 모듈 복합시스템의 총 에너지 수익분석 결과

온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 2015년 7월의 면세유류가격(2015년 7월 16일 기준: 영농정보-농협) 대비 연간 수익성 분석 결과는 태양광 발전수익이 등류 대비 154,782원 및 경유대비 153,072원으로 나타났고(표 3-19), 태양열에 의한 수익은 등류대비 377,668원, 경유대비 373,495원으로 나타났다(표 3-20). 따라서 다 모듈 복합시스템의 태양광 발전 및 태양열 집열을 합한 연간 총 수익은 등류대비 532,450원 및 경유대비 526,567원으로 분석되었다(표 3-21).

[표 3-19] 연간 태양광 발전 수익성 분석

태양광 발전 수익(원)					
등유(면세)	등유(일반)		경유(면세)	경유(일반)	
710.00원/L	967.90원/L	1000.00원/L	710.00원/L	1354.65원/L	1400.00원/L
154,782	211,005	218,003	153,072	292,055	301,832

[표 3-20] 연간 태양열 수익성 분석

태양열 수입(원)					
등유(면세)	등유(일반)		경유(면세)	경유(일반)	
710.00원/L	967.90원/L	1000.00원/L	710.00원/L	1354.65원/L	1400.00원/L
377,668	514,853	531,927	373,495	712,613	736,470

[표 3-21] 태양광-열 복합 시스템 수익성 분석

복합 시스템 총 에너지 수익(원)						
기간	등유(면세)	등유(일반)		경유(면세)	경유(일반)	
	710.00원/L	967.90원/L	1000.00원/L	710.00원/L	1354.65원/L	1400.00원/L
2014.11.01 ~ 2015.03.31	532,450	514,853	531,927	526,567	712,613	736,470

(아) 경제성 분석 및 평가

식 (3-5)의 순현재가치(NPV) 평가방법을 적용하여 시스템 설비 운용연도별 수익성과 투자회수 기간을 산출하였다. [표 3-22]와 [표 3-23]은 온실 난방을 위해 각각 계통연계형과 분리독립형으로 다 모듈 복합시스템을 운용할 경우 연도별 수익성을 순현재가치로 산출한 결과 값으로 수익성 및 투자회수기간을 바탕으로 경제성 분석을 수행하였다.

경제성 분석결과 계통연계형의 경우 투자회수기간(Payback Period)이 면세유 등유 및 경유 대비 10년으로 분석되었으며, 내구연수인 20년 시점에선 등유 및 경유 대비 각각 2,174,152원, 2,097,965원의 수익이 있는 것으로 분석되었다[표 3-22]. 또한 온실 난방을 위해 분리독립형으로 운용될 경우는 투자회수기간(Payback Period)이 면세유 등유 및 경유 대비 17년으로 분석되어 계통연계형에 비해 7년이 더 요구되었으며, 내구연수인 20년 시점에선 등유 및 경유 대비 각각 600,393원, 524,206원의 수익이 있는 것으로 평가되었다[표 3-23].

따라서 온실 난방을 위해 다 모듈 복합시스템이 계통연계형으로 운용될 경우 경제성이 매우 큰 것으로 나타났으며, 분리독립형은 계통연계형에 비하여 수익성이 낮으나, 계통연계가 불가능한 지역이나, 전기시설이 미비한 곳에 적용이 필요 하므로, 충분한 가치가 있을 것으로 판단된다. 또한 유류가격이 폭등할 경우 온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성은 매우 커질 것으로 판단된다.

본 연구결과를 기초로 표면적 300평 기준의 온실에 태양광-열 복합시스템을 설치하는데 약 3억원 정도가 소요될 것으로 추정되며, 따라서 온실표면적당 평당 1백만원 정도 비용이 예상된다. 그러나 실용화되어 대량생산이 가능하게 되면 태양광-열 복합시스템의 설비비용을 크게 낮출 수 있을 것으로 사료된다. 또한 태양광-열 복합시스템이 한걸 비닐온실의 난방에 적용된다면 피복재의 열절감을 값 저하에 따라 약 90%의 난방성능을 나타낼 것으로 분석된다.

[표 3-22] 계통연계형-면세유(등유, 경유) 대비 순현재가치(NPV)

시스템 운용연차	순현재가치(원)	
	등유(710.00원/L)	경유(710.00원/L)
0	-3,292,550	-3,298,433
1	-2,858,948	-2,870,407
2	-2,447,951	-2,464,696
3	-2,058,380	-2,080,135
4	-1,689,119	-1,715,623
5	-1,339,108	-1,370,113
6	-1,007,345	-1,042,616
7	-692,877	-732,193
8	-394,803	-437,952
9	-112,268	-159,051
10	155,537	105,310
11	409,381	355,889
12	649,991	593,405
13	878,058	818,539
14	1,094,234	1,031,936
15	1,299,141	1,234,207
16	1,493,366	1,425,934
17	1,677,465	1,607,666
18	1,851,967	1,779,923
19	2,017,371	1,943,200
20	2,174,152	2,097,965

[표 3-23] 분리독립형-면세유(등유, 경유) 대비 순현재가치(NPV)

시스템 운용연차	순현재가치(원)	
	등유(710.00원/L)	경유(710.00원/L)
0	-4,567,550	-4,573,433
1	-4,157,645	-4,169,104
2	-3,769,109	-3,785,854
3	-3,400,829	-3,422,584
4	-3,051,748	-3,078,252
5	-2,720,865	-2,751,871
6	-2,407,233	-2,442,505
7	-2,109,951	-2,149,267
8	-1,828,167	-1,871,316
9	-1,561,073	-1,607,856
10	-1,307,904	-1,358,131
11	-1,067,933	-1,121,424
12	-840,472	-897,058
13	-624,869	-684,388
14	-420,507	-482,806
15	-226,798	-291,732
16	-43,188	-110,620
17	130,850	61,050
18	295,815	223,771
19	452,180	378,009
20	600,393	524,206

4. 요약 및 결론

다 모듈 태양광-열 복합시스템을 통하여 생산된 전기는 축전지에 저장되며, 회수된 열은 축열조에 저장된다. 축전지에 저장된 전기는 복합시스템 운영에 필요한 펌프, 태양추적장치, 축열조의 보조열원 등에 공급되며, 축열조에 축열된 열은 축열매체를 통해 온실 내부에 설치된 라디에이터를 순환하며 온실 가온에 사용된다.

본 연구에서 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 이용한 온실난방 실증실험은 2015년 2월부터 4월의 기간 동안 8주간 수행되었으며, 유류대비 경제성 분석이 수행되었다. 다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 난방 실험 및 경제성 분석 결과는 다음과 같다.

- 가. 실험 전 기간 동안 축열조 내의 축열매체 온도는 대체적으로 45 ~ 55℃로 잘 유지됨을 나타내었다.
- 나. 다 모듈 태양광-열(CPV/T) 복합시스템을 이용한 온실난방 실험결과 야간의 기온이 낮아질 때 온실 내의 온도가 10 ~ 15℃로 잘 유지됨을 알 수 있었다.
- 다. 온실 내 야간의 상대습도는 실험기간 3월 21일부터 28일까지는 대체로 60% 이하의 낮은 값을 나타내었으나, 3월 19일부터 4월 20일까지의 실험기간 동안에는 야간의 상대습도가 대부분 80% 이상까지 상승하는 것으로 나타났다.
- 라. 온실 난방을 위해 다 모듈 복합시스템이 계통연계형으로 운용될 때 경제성은 매우 큰 것으로 나타났으며, 분리독립형은 계통연계형에 비하여 수익성이 낮게 나타났다.
- 마. 경제성 분석에 낮은 유류 가격이 이용되었으나, 유류 가격이 상승할 경우 온실 난방을 위한 다 모듈 복합시스템의 경제성은 매우 커질 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

1. 세부 연구목표 대비 달성도

구분 (연도)	세부 연구목표	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)
1차년도 (2012)	• 프레넬 태양광 집광기 제작	▶프레넬 집광기 집광효율의 우수성	100
	• 열 회수를 위한 집광기 흡수기 개발	▶흡수기 열 회수 성능의 우수성	
	• 단일 CPV 장착 태양광-열 복합 시스템 설계/제작	▶단일 CPV 장착 태양광-열 복합시스템의 구조적 우수성	
	• CPV 장착 단일 프레넬 태양광-열 복합 시스템 성능 분석	▶CPV 장착 단일 태양광-열 복합시스템 성능의 우수성	
2차년도 (2013)	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 설비	▶다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합 시스템 설비의 우수성	100
	• 태양 추적장치 설비	▶태양 추적장치의 구조적 우수성	
	• 태양열 축열조 설비	▶축열조의 단열 및 구조적 우수성	
	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 성능분석 및 경제성분석	▶다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템의 집열 및 발전 효율의 우수성	
3차년도 (2014)	• 온실난방 설비	▶온실난방 설비의 우수성	100
	• 태양광 발전 독립형 시스템 설비	▶태양광 발전 독립형 시스템 설비의 우수성	
	• 온실 내 온습도 모니터링 시스템 구축	▶온실내 온습도 모니터링 시스템의 완전성	
	• 다 모듈 복합시스템을 이용한 온실의 난방 효율 분석 및 경제성분석	▶다 모듈 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실의 난방효율의 우수성과 에너지 경제성분석의 적합성	
최종 평가	• 다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 설비	▶다 모듈 CPV 장착 프레넬 태양광-열 복합시스템 설비의 우수성	100
	• 태양광-열 복합시스템을 이용한 온실 난방실험 및 난방효율 분석	▶다 모듈 태양광-열 복합시스템 난방효율의 우수성	
	• 에너지 경제성 분석	▶유류비용 대비 경제적 효과의 우수성	

2. 연구성과 목표 및 달성도

가. 연구성과 목표 및 달성도

(단위 : 건수)

구분	특허		신품종				인력양성	논문		기타	
	출원	등록	품종명칭	품종등록	품종생산수입신고	품종보호		SCI	비SCI		
						출원					등록
1차년도	목표						2		2		
	달성	3					2		4		
2차년도	목표	1					3	1	1		
	달성	1					3	1	11		
3차년도	목표	1	1				4	1	1		
	달성		3				4	2	7		
계	목표	2	1				9	2	4		
	달성	4	3				9	3	22		

나. 연구성과 활용목표 및 달성도

(단위 : 건수)

구분		기술실시(이전)	상품화	정책자료	교육지도	언론홍보	기타
활용건수	목표	1	1			1	
	달성					3	

* 기술실시 및 상품화는 연구개발 종료 후 각각 1년 및 3년 내로 추진할 계획임

다. 정량적 목표 및 달성도

(주요성능 Spec)	단위	전체항목에서 차지하는 비중(%)	개발목표치			목표달성치			비고
			1차년도	2차년도	3차년도	1차년도	2차년도	3차년도	
복합시스템 집열효율	%	20	50이상	50이상		60	61		
복합시스템 발전효율	%	20	20이상	20이상		26	25		
복합시스템 열에너지 출력		15	200이상	1,000이상		213,8	1,758		
복합시스템 발전 출력		15	90이상	500이상		91.9	656		
온실 난방효율	%	15			60			100	
유류대비 에너지 경제성	%	15			60			100	
합 계		100%							

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 측면

- 가. 집광형 태양전지(CPV)를 부착한 프레넬 태양광-열 복합시스템 개발은 농업시설에 필요한 열과 전기 에너지를 동시에 생산할 수 있어 농업시설물(온실, 축사) 및 농가의 난방뿐만 아니라 건조장치의 열원으로 효율적으로 이용될 수 있을 것임.
- 나. 태양광 집광 및 발전 효율이 우수한 CPV 부착 태양광-열 복합시스템을 개발하여 농업시설 난방에 이용함으로써 기존의 유류사용 난방기를 대체할 수 있고 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 시스템이 될 것임.
- 다. 본 과제를 통하여 선진국 수준이상의 가격경쟁력을 갖춘 새로운 태양광-열 복합시스템 모델 개발이 용이할 것임.
- 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 것임.
- 마. 본 연구는 태양 열 및 전기를 효율적이고 생산 할 수 있는 장치개발의 모델이 될 것이며, 태양열 집열기술 및 태양광 발전기술에 대한 복합적 응용기술을 증진시키는 데 큰 도움이 될 것임.

2. 경제·산업적 측면

- 가. 유류비용의 증가로 에너지난을 겪고 있는 농촌의 농업시설 난방의 열원을 위한 대체에너지로 이용함으로써 농업에너지 난을 타개할 수 있을 뿐만 아니라 정부의 적극적 지원 하에 태양광-열 복합시스템을 확대 보급할 수 있을 것임.
- 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 기대됨.
- 다. 기후변화 협약 후 선진국들의 경우 CO₂ 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 예상됨.
- 라. 본 과제를 통하여 농업시설난방을 위한 저비용의 고효율 태양광-열 복합시스템을 농업에 이용함으로써 농가의 에너지 비용을 줄이고, 대규모 수요 창출에 의한 유류의 수입대체 효과를 극대화시킬 수 있음.

제 5 장 연구개발 성과 및 활용계획

제 1 절 실용화 및 산업화 계획

1. 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 농업시설 난방시스템으로의 활용성을 극대화 할 것임.
2. CPV 프레넬 태양광 집광시스템을 기업체에 기술 이전함으로써 기술료징수가 가능케 할 것이며, 기업체의 독자적인 기술 확보 및 기업체의 주 생산기종이 되도록 할 것임.
3. 본 연구에 의해 개발될 시스템의 농업부분 산업화 가능 분야는 [표 5-1]과 같음.

[표 5-1] 개발된 시스템의 농업부분 산업화 가능 분야

농업 시설용 시스템	농가 가정용 시스템
온실 난방시스템	급탕 기름보일러용 농가주택
농수축산물 건조시스템	가스보일러 사용 농가 주택
축산시설 난방시스템	사무실 난방 시스템
양어장 가온시스템	

4. 본 연구에 의한 개발기술의 농산업 이외에도 타 산업 활용분야는 다음과 같음.
 - 산업용 저온 공정분야: 식품용기(병&캔) 세척용 온수, 염색공정, 벽돌 양생
 - 중소형/대용량 온수급탕·냉난방: 일반/공동주택, 공공건물/복지시설, APT단지/상업용 건물
5. 본 연구개발을 통한 Pilot Plant 규모의 태양광-열 복합시스템을 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획임.
6. 다 모듈 태양광-열 복합시스템은 신기술인증 획득을 통해 국가 지원 하에 보급을 극대화할 것임.
7. 단계별 산업화 추진계획은 다음과 같음

[표 5-2] 단계별 산업화 추진계획

단계	제품 양산계획
개발완료	- 복합시스템 제조원가 절감방안(기술변경, 생산공정 측면) 확보 집광기 공정설계 구축 및 생산설비 구축
산업화(1차)	- 양산을 위한 복합시스템 생산 공정 자동화 구축 - 흡수기 및 태양추적 제어부 자체생산 - 공장 직관/사후관리체계 확보 - 품질검사/시험 체계 구축
산업화(2차)	- 성능 및 내구성향상을 통한 제품의 신뢰성 확보 - 고객 지향적인 사후관리체계 강화 - 다기능 차온제어기, 보수용 배관재 및 배관이음쇠, Support Frame & Channel 자체생산 - 자체생산 부품의 다용도화 개발 및 사업화 추진 - OEM 방식의 국내업체 제휴 추진
산업화(3차)	- 미국 인증기관(SRCC) 인증 획득 및 복합시스템 수출 추진 - 사업추진 결과 및 사업성 분석을 통해 제품모델 다양화

제 2 절 기술자료 및 정책자료 제공

1. 국외학술지: 3건

- 가. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2014. Thermal Performance evaluation of a conical solar water heater integrated with a thermal storage system. Energy Conversion and Management 87: 267-273. (SCIE)
- 나. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2015. Parametric performance analysis of a concentrated photovoltaic co-generation system equipped with a thermal storage tank. Energy Conversion and Management 92: 215-222. (SCIE)
- 다. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2015. Experimental and numerical studies of a U-shaped solar energy collector to track the maximum CPV/T system output by varying the flow rate. Renewable Energy 76(2015): 735-742.(SCIE)

2. 국외학술회지: 6건

- 가. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2014. Experimental evaluation of conical solar concentrator for water heating system under different operating

conditions. Proceedings of the 7th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB): 120-126.

- 나. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2014. Numerical modeling and experimental validation of concentrating photovoltaic/thermal system with SOG Fresnel lens. Proceedings of the 7th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB): 127-133.
- 다. M. Imtiaz Hussain and Gwi Hyun Lee. 2014. Numerical and experimental analyses of solar energy collector for concentrating photovoltaic co-generation system. Proceedings of International Conference of Agricultural Engineering. Ref: CO151.
- 라. M. Imtiaz Hussain and Gwi Hyun Lee. 2014. Numerical thermal analysis of helical-shaped heat exchanger to improve thermal stratification inside solar storage tank. Proceedings of International Conference of Agricultural Engineering. Ref: CO152.
- 마. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2015. Performance assessment and economic analysis of the CPV/T system for greenhouse air heating in South Korea. Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Global Business, Engineering, Energy, Agriculture and Health (ICGBEEAH2015), Paper Number, P013: 137-150.
- 바. Joon Yeal Hwang, M. Imtiaz Hussain, Sung Jin Kim, Gwi Hyun Lee. 2015. Performance analysis of concentrated cogeneration system under different operating conditions. Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Global Business, Engineering, Energy, Agriculture and Health (ICGBEEAH2015), Paper Number, P014: 151-163.

3. 국내학술회지: 14건

- 가. 김성진, 신준호, 이귀현. 2013. CPV 셀을 이용한 집열 및 발전 복합시스템의 효율특성 분석. 2013. 한국농업기계학회/한국생물환경조절학회 2013년 춘계공동 학술대회 논문집: 113-114.
- 나. 박동우, 이귀현, 이명환. 2013. 원통형 흡수기를 이용한 프레넬 태양열 집광기의 효율 분석, 한국농업기계학회/한국생물환경조절학회 2013년 춘계공동학술대회 논문집: 191-192.

- 다. 김성진, 박동우, 이귀현. 2013. SOG 프레넬렌즈를 이용한 태양열 집열시스템의 효율 분석. 한국농업기계학회/한국생물환경조절학회 2013년 춘계공동학술대회 논문집: 193-194.
- 라. 신준호, 이명환, 이귀현. 2013. 이중원통형 흡수기를 갖는 프레넬 집광 시스템의 성능분석, 한국농업기계학회/한국생물환경조절학회 2013년 춘계공동학술대회 논문집: 227-228.
- 마. 신준호, 이귀현. 2013. 태양광-열 복합 집광시스템의 유량에 따른 성능분석. 한국농업기계학회 2013년 추계 학술대회 논문집 Vol 18, No. 2: 103-104.
- 바. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2013. Experimental validation of a solar thermal collector model for CPV/T system to find optimal thermal and electrical power. 한국농업기계학회 2013년 추계 학술대회 논문집 Vol 18, No. 2: 109-110.
- 사. 장영석, 이귀현. 태양광-열 복합 집광시스템의 에너지 효율분석. 2013. 한국농업기계학회 2013년 추계 학술대회논문집 Vol. 18, No. 2: 265-266.
- 아. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. Transient numerical analysis of heat exchanger inside the solar tank at different flow rates. 2013. 한국농업기계학회 2013년 추계 학술대회논문집 Vol. 18, No. 2: 269-270.
- 자. 이귀현, 신준호. 태양광-열 복합시스템의 열매체 입구온도 및 유량에 따른 성능분석. 2014. 한국농업기계학회 2014년 춘계 학술대회 논문집 Vol 19, No. 1: 222-223.
- 차. 이귀현, 신준호. 2014. 온실 난방을 위한 태양열-전기 동시 생산 복합시스템 성능분석. 한국생물환경조절학회 2014년도 춘계학술발표대회 논문집 23(1): 219-220.
- 카. M. Imtiaz Hussain, Gwi Hyun Lee. 2014. Performance analysis of concentrated photovoltaic thermal system for heating and cooling of greenhouse. 한국생물환경조절학회 2014년도 춘계학술발표대회 논문집 23(1): 249-250.
- 타. M. Imtiaz Hussain, Joong Seok Park, Gwi Hyun Lee. 2014. Thermal analysis of concentrated solar collector equipped with different storage capacities. 한국농업기계학회 2014년 추계 학술대회 논문집 Vol 19, No. 2): 37-38.
- 파. M. Imtiaz Hussain, Da Hyun Kim, Joon Yeal Hwang, Gwi Hyun Lee. 2014. Outdoor performance analysis of linear solar thermal collector for greenhouse heating. 한국농업기계학회 2014년 추계 학술대회 논문집 Vol 19, No. 2: 173-174.

하. 황준열, M. Imtiaz Hussain, 이귀현. 2015. 태양에너지를 이용한 에너지 자립형 온실 난방시스템. 한국농업기계학회/한국생물환경조절학회 춘계공동학술대회 논문집: 37-38.

4. 특허: 1건 출원. 3건 출원 및 등록

가. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 관형 흡수기를 이용한 태양열 집열용 집광장치, 출원일: 2013. 05. 02, 출원번호:10-2013-0049568

나. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 태양광 발전 및 태양열 축열 복합시스템, 등록일: 2014. 08. 08, 등록번호: 10-1430864

다. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 태양열 집열용 집광장치, 등록일: 2014. 08. 28, 등록번호: 10-1437675

라. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 태양광 및 태양열을 이용한 멀티발전모듈 시스템, 등록일: 2015. 05. 22, 등록번호:10-1524405

5. 향후: 국제학술지(SCI) 2건

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 태양 집광기술

1. 집광을 위한 광학 기술

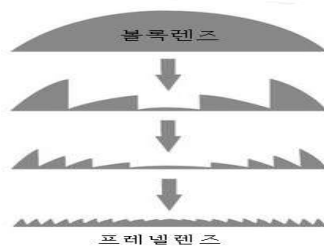
집광장치는 태양열 집열기 분야에서 고온으로 집열하기 위하여 사용하거나, 태양 전지 모듈에 도달하는 태양빛을 증가시켜주는 역할을 하며, 집열기의 형태나 태양 전지모듈의 형태에 따라 원형집광장치와 선형집광장치로 구분할 수 있다. 원형집광장치로는 돋보기, 원형프레넬필름, 접시형이 있으며 선형집광장치로는 선형프레넬렌즈, 구유(Trough)형 등이 있다.

일반적인 렌즈를 사용할 경우 구면에 의한 수차를 근본적으로 갖게 되며 이는 집광시 손실량으로 나타난다. 이러한 단점을 해결하기 위해 고안된 렌즈 중의 하나가 프레넬렌즈이다. 프로젝터나 평면 돋보기 등 다양한 분야에서 이용되고 있는 프레넬렌즈를 태양 집광용에서 적용 할 경우는 단순한 썸기 형태의 비구면 형상에서 효율을 극대화하는 방법들이 연구 개발되고 있다(김기현, 2009).

2. 프레넬렌즈의 원리

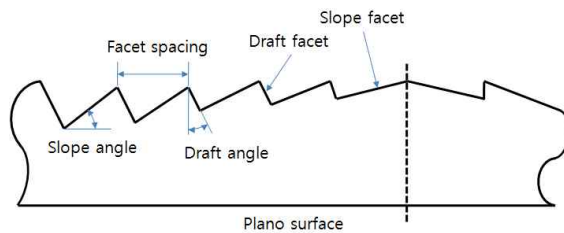
집광형 광학계로 크게 mirror type과 lens type으로 나누어지며 그 중 lens type의 집광형 광학계로 가장 많이 사용되는 것이 프레넬렌즈이다. 프레넬 렌즈의 굴절면의 형태는 그 렌즈의 초점을 결정짓는다. 그러나 굴절면 사이에 있는 재료의 부피는 렌즈의 광학적 특성에 거의 영향을 미치지 않기 때문에, 프레넬 렌즈는 재료의 부피를 최소화하고, 초점은 그대로 유지할 수 있도록 제작된 것이다.

프레넬렌즈의 구조는 중심 부분의 groove들은 plane surface에 거의 평행하고, edge로 갈수록 경사가 가파르게 구성된다. [그림 6-1]과 같이 프레넬 렌즈는 조각난 형태의 구면 또는 비구면 형상의 단일 렌즈이기 때문에 각각의 segment에서 서로 다른 power를 갖는다(유광선 등, 2010).



[그림 6-1] 프레넬렌즈 표면 groove 설계 원리

프레넬 렌즈는 렌즈를 지나는 광선들에 각각 위상차를 줌으로써 어떤 원하는 평면에 광선들이 집속되게 되고 그곳에서 모든 선속이 보강간섭을 일으키게 된다. 즉 부피가 큰 렌즈를 초점까지의 광로차가 각각 반파장의 정수배가 되는 곳을 잘라서 평면에 붙인 형태가 프레넬렌즈의 형태이다. 따라서 렌즈는 여러 가지 기울기와 폭을 가진 groove로 형성되고, 블록렌즈처럼 이러한 렌즈들은 두께가 동심원의 ring으로서 곡선면에 변화를 일으킴으로서 감소된다. ring의 폭은 반경의 제곱에 따라 증가하며 그 때 렌즈의 전체 두께는 일정해진다(정병호, 2012).



[그림 6-2] 프레넬 렌즈의 구조

다음과 같은 몇 가지 요소가 프레넬 렌즈의 특징을 결정하게 된다. 첫 번째 광학 재질은 사용하고자 하는 과장영역에 대해 투과도가 높아야하고 대구경 가공 시 외형 가공에 문제가 없어야 한다. 두 번째 초점거리는 일반 렌즈에서와 동일하게 중심부 zone에 의해 근축 광학적으로 결정되는 요소이다. 모든 높이에서 각각의 power는 고효율 광학계일수록 일정해야 한다. 세 번째 groove의 개수 및 기울기는 광량의 손실이 없이 광학계에서 굴절이 일어나도록 기하학적인 구조에 의해 결정된다. 모든 투과성 재질은 반사, 흡수, 산란 등에 의해 손실이 일어나는데 이 중에서 경계면에서의 반사에 의한 손실이 중요한 인자가 된다. 매질에서 공기로 입사하는 입사각이 임계각보다 크면 내부 전반사에 의해 모든 광이 상면에 도달하지 못하게 되므로 전반사에 의한 손실을 최대한 줄이기 위하여 각각의 slope angle의 기울기를 조절해야 한다.

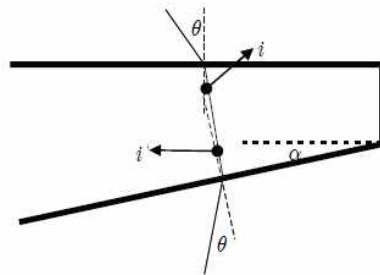
이 중에서 경계면에서의 반사에 의한 손실이 중요한 인자로서 광학계의 투과율은 식 (6-1)로 주어진다.

$$T = \left[1 - \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{2\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} - \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{2\tan^2(\phi_1 + \phi_2)} \right] \times \left[1 - \frac{\sin^2(\phi_3 - \phi_4)}{2\sin^2(\phi_3 + \phi_4)} - \frac{\tan^2(\phi_3 - \phi_4)}{2\tan^2(\phi_3 + \phi_4)} \right] \quad (6-1)$$

여기서 ϕ_1 은 공기와 물질의 경계면에서의 입사각, ϕ_2 은 공기와 물질의 경계면에서의 굴절각, ϕ_3 은 물질과 공기의 경계면에서의 입사각, ϕ_4 은 물질과 공기의 경계면에서의 굴절각이다(정병호, 2012).

3. 프레넬렌즈 설계 요소

태양전지에서 적용되는 방식의 렌즈는 groove in 방식으로 설계해야하고 프레넬렌즈의 스텝 중심에서의 반경, 렌즈에 사용되는 물질의 공기에 대한 굴절률, 초점거리, 렌즈의 두께, 스텝 폭의 다섯 가지 변수에 의해 groove의 기울기가 결정된다. 프레넬렌즈에서 입사된 빛이 편향되는 각에 영향을 주는 변수는 입사되는 입사각과 렌즈의 각각의 facet spacing의 기울기를 나타내는 기울기 각이다. [그림 6-2]는 기울기의 각도와 굴절각 사이의 관계를 나타낸다.

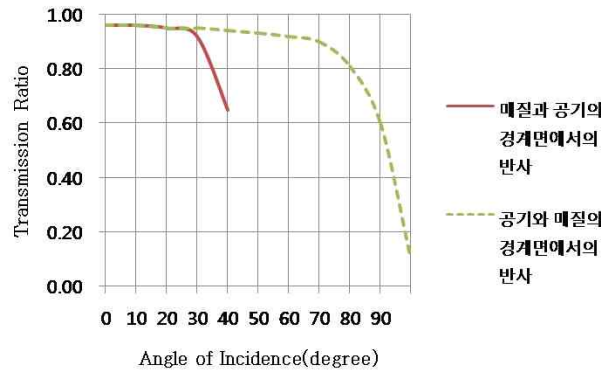


[그림 6-2] 프레넬 렌즈의 입사각과 기울기각

먼저 입사되어 들어오는 빛의 입사각을 θ 로 정의하면 lens의 첫 번째 면을 통과하여 진행되는 빛의 굴절각을 i 라 하고 그 빛이 다시 lens 두 번째 면을 지나 공기 중으로 굴절되어 나가는 두 번째 면에 대한 입사각은 i' , 굴절각은 θ' 으로 정의한다. Snell's Law에 따라 i , i' 와 θ , θ' 의 관계식은 식(6-2)와 같다(유광선 등, 2010).

$$n = \frac{\sin(\theta)}{\sin(i)} = \frac{\sin(\theta')}{\sin(i')} \quad (6-2)$$

또한 [그림 6-3]과 같이 매질에서 공기로 입사하는 입사각이 약 41°보다 크면 내부 전반사에 의해 모든 광이 상면에 도달하지 못하게 됨을 알 수 있다. 따라서 전반사에 의한 손실을 최대를 줄이기 위해 각각의 slope angle을 조절해야 한다.



[그림 6-3] 렌즈의 입사각과 투과율(김기현, 2009)

프레넬렌즈 설계에 있어서 핵심은 각 ring의 곡률 중심이 구면 수차를 제거하기 위해 중심으로부터의 거리가 축을 따라 감소한다는 것이다. 구면 수차를 제거하고, 모든 근축 광선이 같은 점에 맺히도록 정밀하게 각 원추의 표면을 잘라야 한다. 프레넬렌즈의 불연속적인 면에 의해 각 파면의 변화는 visible image의 질을 퇴화시킬 수도 있으므로, 각 groove는 빛이 매우 정밀하게 맺히도록 연마되어야 한다. 종래 광학계는 주로 구면을 이용하였는데, 그러한 구면은 광학계의 여러 annular section에서 나오는 광선들이 광축을 따른 여러 가지 점에서 맺혀지는 중구면 수차를 가진 광학계를 만들어낸다.

일반적으로 프레넬렌즈는 평행빔을 향해 groove가 있고, 초점을 향해 plano side가 있는 경우를 주로 다루지만, 프레넬렌즈는 크게 두 가지 경우로 생각할 수 있다. 이 두 가지 경우는 앞에서 설명한 프레넬렌즈의 특징을 결정짓는 Step 중심에서의 반격, 렌즈에 사용되는 물질의 공기에 대한 굴절률, 초점거리, 렌즈의 두께, 그리고 마지막으로 step 폭, 이 다섯 가지 변수에 의해 groove의 기울기가 결정된다고 할 수 있다.

Groove out은 평행빔을 향해 groove가 있고, 초점을 향해 plano Side가 있는 경우로서, 이때에는 양쪽 면에서 굴절이 조금씩 다 일어난다. Groove in은 반대의 경우로서, 광축을 따라 평행하게 진행되는 평행빔에 대해 Plano Side에서 굴절이 전혀 일어나지 않는다(유광선 등, 2010).

위 두 가지 경우의 가장 큰 차이는, groove in 경우에, 렌즈의 바깥 표면에 있는 groove가 구면 또는 groove out 렌즈보다 plano surface에 대해 훨씬 더 작은 각도를 이룬다는 것이다. 왜냐하면, plano surface와 이루는 각도가 상대적으로 렌즈의

바깥쪽을 향해 작기 때문에 어떤 렌즈 표면의 작은 warpage나 tilt, 또는 광축에 평행한 광선의 작은 이탈은 광선의 렌즈 표면 사이의 각도에서 실제적으로 매우 큰 이탈을 유도하게 된다.

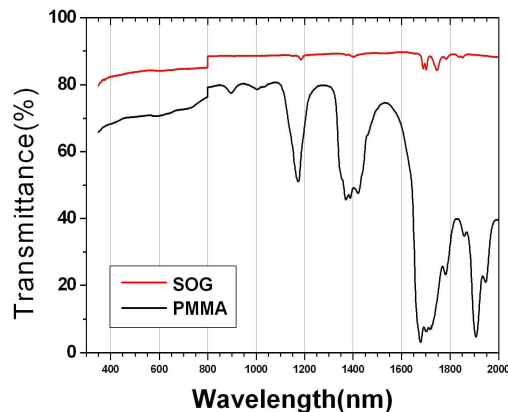
4. SOG 프레넬렌즈의 특성

SOG 렌즈의 제작은 광학용 저철분 강화유리에 고투과율 광학실리콘을 일정한 두께로 도포한 후 이를 렌즈 설계에 따른 방식으로 회전 절삭을 통해 렌즈형상을 가공하거나 금형을 사용한다. 광학용 실리콘은 내후성이 뛰어나 자외선에 의한 물성 저하는 거의 없는 것으로 알려져 있으며 굴절률 $n=1.46$ 정도의 투명성을 갖는 오일 컴파운드를 이용한다. 특히 표면장력이 낮고 미독성, 내산화성, 열적 안정성 등으로 인해 광학렌즈의 소재로 매우 적합한 소재이다. 제작은 3.0mm의 저철분 강화유리 위에 0.5mm 두께의 실리콘을 도포한 후 형상가공을 수행한다. [표 6-1]은 기존의 PMMA 렌즈와 SOG 렌즈의 특성을 비교하여 나타냈다(정병호 등, 2012).

[표 6-1] PMMA 렌즈와 SOG 렌즈의 특성

구분	SOG 렌즈	PMMA 렌즈
비용	높음	낮은
온도환경	-40℃~180℃	-20℃~60℃
무게(t=3mm)	8kg/m ²	1.5kg/m ²
형상가공	어려움	용이함
취급	어려움	용이함
내구성	우수함	약함

[그림 6-4]에서는 스펙트럼에 따른 SOG 렌즈와 PMMA 렌즈의 투과율 특성을 나타낸다.

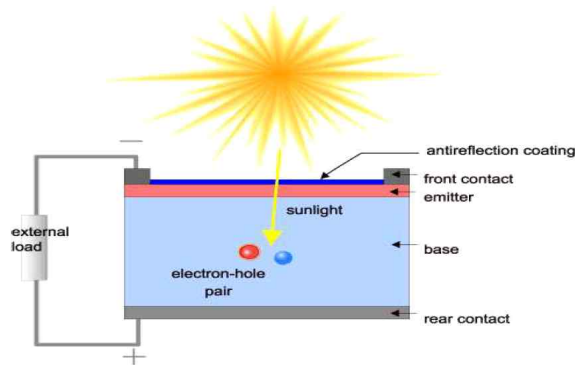


[그림 6-5] SOG 렌즈와 PMMA 렌즈의 투과율 특성(정병호, 2012)

제 2 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 6-6]은 태양전지의 변환 원리를 보여주고 있다.



[그림 6-6] 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

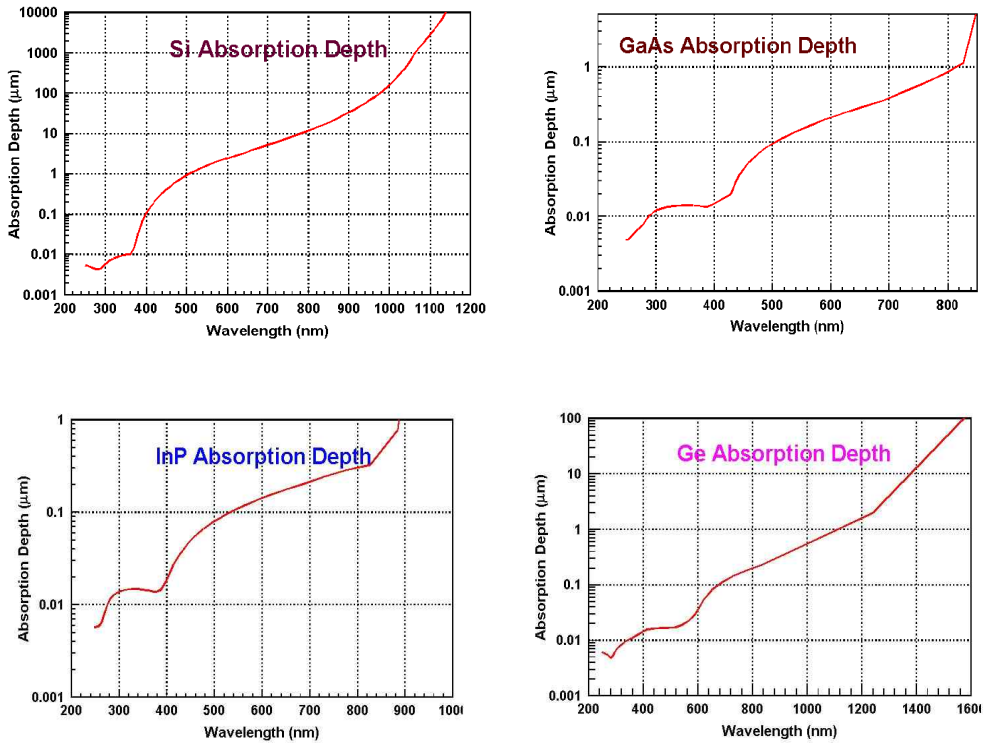
이들은 내부전계에 의해 접합을 가로질러 반대편으로 휩쓸려 내려갈 것이다. 태양 전지의 에미터와 베이스가 서로 연결되어 있는 경우(예를 들어 태양전지가 단락되어 있는 경우), 빛에 의해 생성된 캐리어(또는 광생성 전류)는 외부 회로에 전력을 공급한다.

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 짧는데 에너지가 낮은 빛은 잘 흡수가 되지 않고 흡수 깊이가 더 크다. [그림 6-7] 반도체 재료에 따른 흡수깊이를 보여주고 있다(Christiana Honsberg, Stuart Bowden, 2006).



[그림 6-7] 반도체 재료에 따른 흡수 깊이

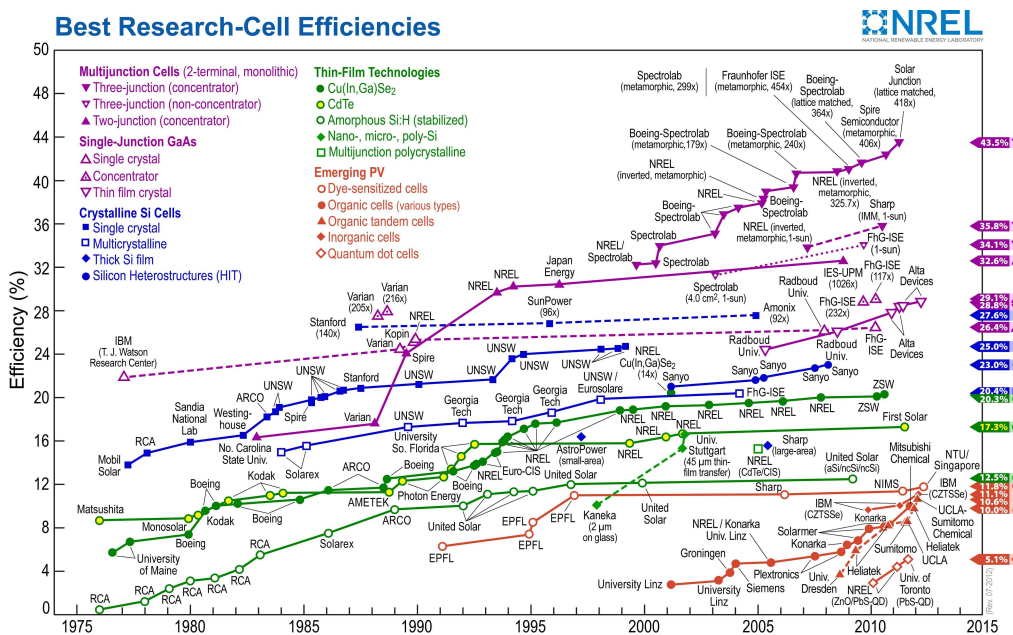
2. 다중접합 고집광 태양전지

(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 가

능하기 때문에, 50% 이상의 초고효율 태양전지를 개발할 수 있는 가능성을 가지고 있다(오병두, 2008, Daniel, 2012).

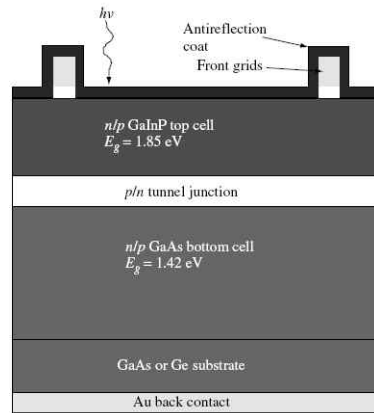
Ⅲ-V족 화합물 반도체 태양전지는 1980년 중반부터 개발이 시작되었고, 1990년 탠덤(tandem) 셀 개발로 높은 효율을 얻었다. 그 이후 Ⅲ-V족 화합물 반도체 태양전지 효율은 매년 약 1%의 빠른 효율 향상을 보이고 있으며, 2007년에는 Spectrolab에서 격자부정합(metamorphic) 성장기법을 이용한 InGaP/GaAs/Ge 적층형 태양전지를 이용하여 효율 40.7% (240배 집광시)를 달성하였다. [그림 6-8]은 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 2012년 발표한 태양전지의 최대 효율의 연도별 발전 현황을 보여주고 있다.



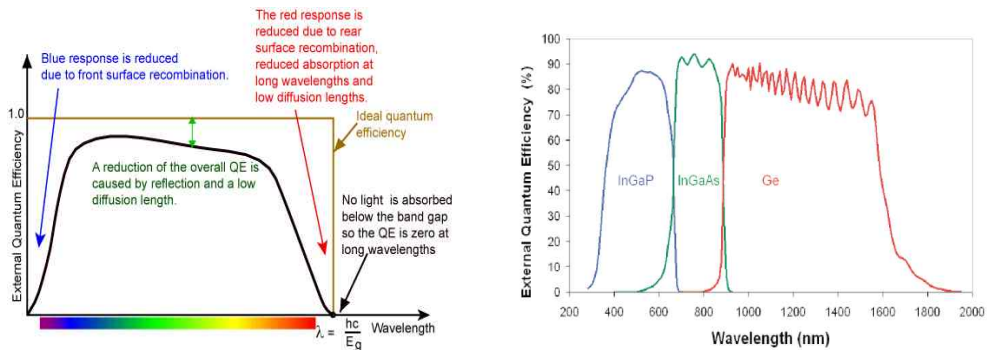
[그림 6-8] 2012년 NREL 발표 태양전지 최고 변환 효율

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 2-17]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 스

스펙트럼을 여러 부분으로 나누어 효율적으로 사용한다. 이로 인하여 다중접합 탠덤 구조의 셀이 단일접합의 셀보다 훨씬 높은 변환효율을 얻을 수 있다. [그림 6-9], [그림 6-10]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 6-9] III-V 족 화합물 반도체 탠덤 구조

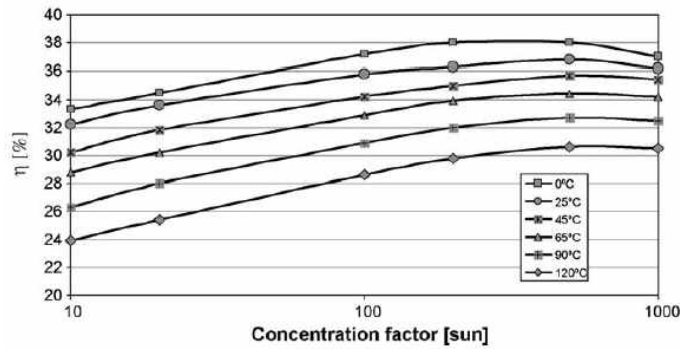


[그림 6-10] 실리콘 태양전지와 다중접합 태양전지의 파장대역별 광자 효율

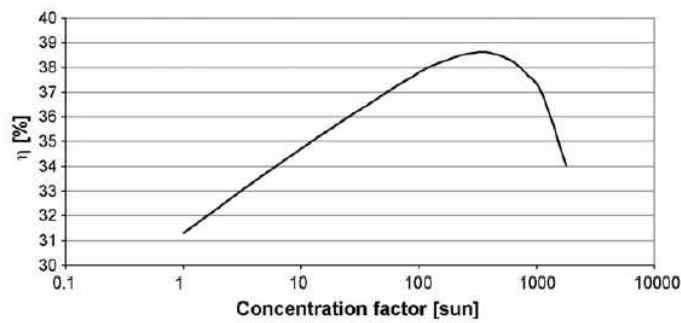
(나) CPV 셀의 효율 특성

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%/℃ 효율이 감소하여 실리콘 계열의 셀보다는 온도의 영향을 적게 받지만 집광비에 따라 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 6-11]은 Spectralab의 CDO-100 셀에 대한 온도별 집광률에 따른 효율 특성 그래프이고, [그림 6-12]는 Emcore의 CJT 셀에 대한 25°C에서 측정된 집광률에 따른 효율 특성이다(G. Zubi et al. 2009).

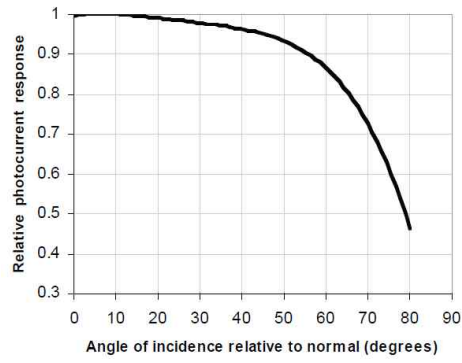


[그림 6-11] Spectralab의 CDO-100 셀에 대한 온도별 집광비에 따른 효율 특성



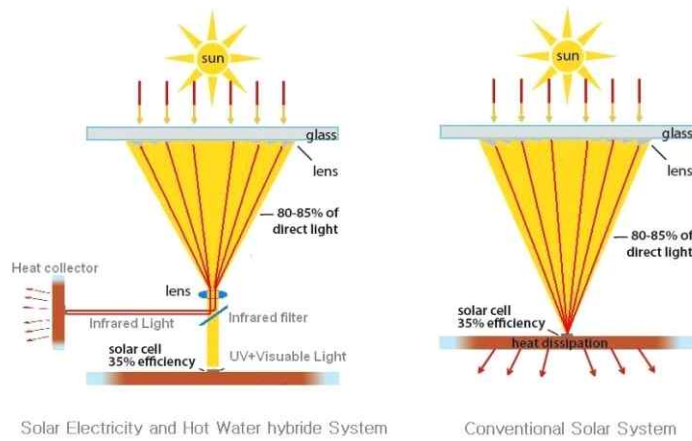
[그림 6-12] Emcore의 CJT 셀에 대한 25°C에서 측정된 집광비에 따른 효율 특성

또한 [그림 6-13]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 6-13] 입사각과 셀 출력과의 관계

방향을 달리하여 태양에너지의 이용 효율을 높이기 위해 그림[6-14]와 같은 복합 시스템을 구성하여 전력 생산 및 온수 생산을 동시에 할 수 있는 시스템들도 연구 개발되고 있다(도규형 등, 2011).



[그림 6-14] 적외선 필터를 사용한 태양광-열 복합시스템

제 7 장 연구시설·장비 현황

해당 없음

제 8 장 연구실 안전관리 이행실적

제 1 절 안전점검

1. 연구실 안전점검

- (1) 개요 : 연구실 내 잠재되어 있는 위험요소의 발견과 개선대책의 수립
- (2) 실시시기 : 2012.07 - 2015.07
- (3) 점검대상 : 연구실 및 실험실
- (3) 점검내용: 연구실 실내 공기의 질(VOC, CO, CO₂, 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 주도하에 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 9 장 참고문헌

1. 곽희열, 윤환기, 유창균, 강용혁, 전홍석, 한귀영. 1996. 태양열 집광형 집열기 (PTC)의 열성능 연구. 태양에너지 16(4): 5-10.
2. 강성원, 김용식, 심창호. 2011. 2차 광학계가 필요없는 프레넬 렌즈를 이용한 중 집광 광학계 시뮬레이션. 한국태양에너지학회 추계학술대회논문집 31(2): 27-33.
3. 김기현. 2009. CPV 광학계 설계. 국민대학교 대학원 학위논문.
4. 대동특수강(주), 대동홍업(주). 2010. 집광형 태양전지의 최신 동향. 월간 전자기술 2010(1): 81-86.
5. 도규형, 한용식, 최병일, 김명배. 2011. CPV 냉각용 열분산기 모듈의 열성능에 관한 실험적 연구. 한국태양에너지학회 논문집 31(4): 94-101.
6. 박승재. 2012. 평판 구조의 집광형 태양광 모듈구조에 관한 연구. 아주대학교 대학원 학위논문.
7. 박원규, 박경호, 전동환, 박상혁. 2012. 고집광 태양광 발전 기술. Optical Science And Technology 16(1): 26-29.
8. 후박군, 윤영식, 송영진. 2010. 다중 접합 태양전지의 특성에 관한 연구. 대한전자공학회 하계학술대회 33(1): 670-672.
9. 서현수, 강성원, 홍진기, 임재우, 심상용, 김용환, 김용식, 이후락, 임병주, 정경열. 2010. 고집광 태양광 시스템을 이용한 Light-pipe 및 Light-tunnel 에 관한 연구. 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회논문집: 243-244.
10. 신구환, 유광선, 차원호, 명로훈, 김용식, 강기환. 2011. 고집광 태양전지의 비균등 조사에 의한 출력특성. 한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집 31(1): 269-274.
11. 신재혁, 이승신, 김상민, 부준홍. 2012. 온도에 따른 집광형 태양전지의 성능에 관한 실험적 연구. 한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집 32(1): 96-101.
12. 안현갑, 금동혁, 유관희, 이귀영, 이동호, 정두호. 2006. 원예시설 자동화. 문운당.
13. 오병두. 2008. 고효율 III-V 집광형 태양전지. 물리학과 첨단기술 July/August 2008: 37-41.
14. 유광선, 신구환, 차원호, 강성원, 김용식, 강기환. 2010. 고집광 태양광 발전용 프레넬 렌즈 설계 및 제작. 한국태양에너지학회 추계학술대회논문집 30(2): 331-336.

15. 유광선, 신구환, 차원호, 명로훈, 김용식, 정호윤, 김동균, 강기환. 2011. 고집광 태양광 발전을 위한 렌즈 및 광 파이프 특성 시뮬레이션. 한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집 31(1): 282-286.
16. 유석주. 2008. 고효율 광전지 출력을 위한 지능형 태양 추적 시스템 개발. 원광대학교 대학원. 박사학위논문.
17. 장종훈. 2012. 신재생에너지 입문. GS인터비전
18. 정경열, 서현수, 강성원, 임재우, 심상용, 김용환, 김용식, 박창대, 임병주, 이후락. 2010. 프리넬렌즈를 이용한 III-V족 CPV 단위 모듈의 야외 성능시험에 관한 연구. 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회논문집: 263-264.
19. 정병호, 윤상진, 정병수, 정용호, 이강연. 2010. 고집광 CPV모듈 제작기술에 관한 연구. 대한전기학회 하계학술대회논문집: 1197-1198.
20. 정병호, 이강연, 박주훈, 문은아, 이상현, 김대곤. 2012. SOG렌즈를 적용한 집광형 태양전지모듈 특성. 전기학회논문지 61(2): 97-102.
21. 조덕기, 윤창열, 김광득, 강용혁. 2012. 법선면 직달일사량 예측기법을 이용한 한반도에서의 태양열발전단지 건설을 위한 최적지 선정에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집 32(3): 77-87.
22. 한원석. 2010. III-V족 화합물 반도체 태양전지의 기술개발 동향 및 전망. 전자부품 2010년 7월호.
23. Daniel. 2012. 집광형 태양전지(CPV) 기술 및 시장 전망(2009~2020). SNE 리서치.
24. William A. W. 1982. 태양열 집열기의 효율곡선. 태양에너지 2(1): 59-66.
25. 비제이파워(주). 2011. 초고효율 III-V족 태양전지 고집광 모듈 패키지 기술개발. <http://blog.naver.com/ioyou64?Redirect=Log&logNo=130113244790>
26. 윤경훈. 2012. PV CDROM 태양광개론. <http://www.pveducation.org/>
27. Chow. T. T., W. He, and J. Ji. 2006. Hydrid photovolataic-thermosyphon water heating system for residential application. Solar Energy 80(2006): 298-306.
28. Donald Rapp. 1981. Solar Energy. prentice hall.
29. Almonacid F., P.J. perez-Higueras, Eduardo F. Fernandez, P. Rodrigo. 2012. Relation between the cell temperature of a HCPV module and atmospheric parameters. Solar Energy Material & Solar Cell 105(2012) 322-327.

30. Ghassan Zubi, Jose L. Bernal-Agustin, Gian Vincenzo Fracastoro. 2009. High concentration photovoltaic system applying III-V cells. *Renewable and Sustainable Reviews* 13(2009) 2645-2652.
31. Gur. M., A. Fribus, A. Dayan. 2007. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal(CPV/T) systems. *Energy Conversion and Management* 48(2007): 2481-2490.
32. Hansan B., Keith C., Heasman, Taps K., Mallick. 2012. Non-uniform illumination in concentrating solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(2012): 5890-5909.
33. Kosmadakis. G., D. Manolakos, and G.Papadakis. Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation. *Solar Energy* 85(2011): 308-324.
34. KENSUKE NISHIOKA, TSUYOSHI SUETO, MASAKI UCHIDA, YASUYUKI OTA. 2010. Detailed Analysis of Temperature Characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge Triple-junction Solar Cell. *Journal of Electronic Materials*, Vol. 39, No. 6, 2010
35. Mohd, Y. H. O., B. Yatim, K. Sopian, and M. N. A. Bakar. 2005. Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy* 30(2005): 2005-2017.
36. Monoz. E., P. G. Vidal, G. Nofuentes, L. Hontoria, P. Perez-Higueras, J. Terrados, G. Almonacid, and J. Aguilera. 2010. CPV standardization: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2010): 518-523.
37. Rosell. J. I., X. Vallverdu, M. A. Lechon, and M. Ibanez. 2005. Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management* 45(2005): 3034-3046.
38. Sendhil K. N., T. K. Mallick, M. Katz, and S. Weingaertner. 2011. Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. *International Journal of Thermal Sciences* 50(2011): 2514-2521.
39. Zahedi. A. 2011. Review of modelling details in relation to low - concentration solar concentrating photovoltaic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(2011): 1609-1614.

40. A Boeing Company. 2011. CPV point focus solar cells.
http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C3MJ_PLUS_2011.pdf
http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C4MJ40_Percent_Solar_Cell.pdf
41. Christiana Honsberg, Stuart Bowden, 2006. PV CDROM. Solar power Lab,
Arizona State University. <http://www.pveducation.org/pvcdrom>
42. Emcore corporation. 2011. Photovoltaic Cell.
http://www.emcore.com/wp-content/uploads/CTJ-Cell_10mm.pdf
<http://suncorepv.com/en/CTJ%20Receiver%20Assembly.pdf>

<첨부> 특허, 논문 및 시장분석 보고서

특허, 논문, 제품(시장) 분석보고서

신청과제명	농업시설 에너지용 태양 열 및 전기 동시 생산 집광시스템 개발		
주관연구책임자	이귀현	주관기관	강원대학교 산학협력단

1. 본 연구관련 국내외 기술수준 비교

개발기술명	관련기술 최고보유국	현재 기술수준		기술개발 목표수준	비고
		우리나라	연구신청팀		
열 및 전기 동시생산 CPV 집광기술	미국	40%	60%	80%	
CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방기술	미국	30%	50%	80%	

- 1) 개발기술명은 본 연구과제 최종 연구개발 목표기술을 의미
- 2) 현재 기술수준은 선진국 100% 대비 우리나라 및 신청한 연구팀의 기술수준 표시
- 3) 기술개발 목표수준은 당해과제 완료 후 선진국 100% 대비 목표수준 제시
- 4) 부가설명이 필요한 경우 비교란에 작성

2. 특허분석

가. 특허분석 범위

대상국가	국내, 국외(미국, 일본, 유럽)
특허 DB	특허정보원 DB(www.kipris.or.kr), 특허지원센터(www.ipac.or.kr), e특허나라(www.patentmap.or.kr)
검색기간	최근 5년간
검색범위	제목 및 초록

나. 특허분석에 따른 본 연구과제와의 관련성

개발기술명		열 및 전기 동시생산 CPV 집광기술	CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방기술
Keyword		태양열, 태양광, 발전, 집광기	태양에너지, 농업시설, 난방
검색건수		77	71
유효특허건수		6	6
핵심특허 및 관련성	특허명	열발전소자를 이용한 전력에너지 변환방법 및 이를 이용한 추적식 태양열 발전장치	샌드위치 패널을 이용한 태양에너지 집열과 냉,난방용 자재의 결합구조
	보유국	대한민국	대한민국
	등록 년도	2009.03.13	2009.12.03
	관련성 (%)	25%	30%
	유사점	태양열 집광장치	태양에너지 난방
	차이점	본 특허는 태양광을 집속하여 얻어지는 고온의 열에너지를 전력으로 변환하기 위한 것으로, 본 연구의 점 집광기에 의한 열 및 CPV 태양전지에 의한 전기 동시생산 시스템과는 구조 및 원리가 매우 다름	본 발명은 샌드위치패널을 이용한 태양에너지 집열과 냉, 난방용 자재의 결합구조에 관한 것으로 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과 차이가 큼
핵심특허 및 관련성	특허명	태양광 집광기	지하공기를 이용한 냉난방장치
	보유국	대한민국	대한민국
	등록 년도	2007. 10. 01	2007. 05. 10
	관련성 (%)	25%	30%
	유사점	태양광 집광기	시설 난방기술
	차이점	본 특허는 해바라기 군락을 형상화하여 태양전지 모듈을 배열한 집광기로, 본 연구의 CPV용 점 집광기와는 형태와 구조 및 집광방법에 차이가 매우 큼	본 발명은 지하의 다공성 암석층으로부터 지하 공기를 흡입하여 시설난방에 이용하는 시스템으로, 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과 차이가 큼.
핵심특허 및 관련성	특허명	태양광 집열장치	모재 내·외측면 투명전도막 코팅방법과 이를 이용한 원통형히터 모듈, 온풍 공급장치, 온수 공급장치 및 온풍 온수공급시스템
	보유국	일본	대한민국
	등록 년도	2010. 11. 15	2010. 01. 13
	관련성 (%)	30%	30%
	유사점	태양광 집광기	시설 난방장치
	차이점	본 특허는 태양열 에너지를 효율적으로 수집할 수 있는 태양광 집열장치에 관한 것으로, 본 연구의 집광기와는 집광방법 및 구조와 형태가 매우 다름.	본 특허는 원통형 히터 모듈, 온풍 공급장치, 온수 공급장치 및 온풍 온수 공급시스템에 관한 것으로, 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과 차이가 큼

개발기술명		열 및 전기 동시생산 CPV 집광기술	CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방기술
Keyword		태양열, 태양광, 발전, 집광기	태양에너지, 농업시설, 난방
핵심특허 및 관련성	특허명	SOLAR LIGHT COLLECTOR	AGRICULTURAL GREENHOUSE WITH PNEUMATIC FILM STRUCTURE
	보유국	일본	일본
	등록년도	2008. 04. 22	2007. 05. 08
	관련성 (%)	30%	15%
	유사점	태양광 집광기	온실 에너지
	차이점	본 특허는 태양광 집광기의 초점거리를 줄이기 위한 장치로 집광기 상부에 반사면을 부착하여 태양광을 집광기 중심 하부에 집광하는 선집광 장치로, 본 연구의 CPV용 점집광 시스템의 구조 및 기능면에서 매우 다름.	본 특허는 공기로 채워진 필름을 비닐하우스 재료로 이용하여 온실의 에너지 절약을 목적으로 한 것으로, 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과 차이가 큼.
핵심특허 및 관련성	특허명	SOLAR HEAT COLLECTOR	HEATING DEVICE FOR GREENHOUSE
	보유국	일본	일본
	등록년도	2009. 06. 12	2009. 03. 10
	관련성 (%)	30%	20%
	유사점	태양광 집광시스템	온실 난방을 위한 장치
	차이점	본 특허는 태양광을 반사키는 거울을 고정하는 지지대의 높이를 태양의 움직임에 따라 변화시킴으로서 집광효율을 향상시키는 장치로, 본 연구의 CPV 집광시스템과는 큰 차이가 있음.	본 연구는 일반 기름 난방기에 의해 발생하는 CO ₂ 양을 줄일 수 있는 온실 난방용 히터에 관한 것으로, 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과 차이가 큼.
핵심특허 및 관련성	특허명	HIGH EFFICIENCY SUNLIGHT HEAT COLLECTING APPARATUS	HYBRID HEAT STORAGE AGENT, HEAT STORAGE MATERIAL USING THE SAME, AND HEAT RETENTION AND STORAGE SYSTEM UTILIZING THE SAME
	보유국	일본	일본
	등록년도	2008. 05. 02	2008. 12. 08
	관련성 (%)	30%	20%
	유사점	태양광 집광장치	태양열 등 열을 시설에 이용하기 위한 시스템
	차이점	본 특허는 태양광을 집열하는 부분과 집열된 열을 열매체에 전달하여 회수하는 장치로 구성되어 있으며, 본 연구의 CPV 집광시스템과는 집광방법에 큰 차이가 있음.	본 특허는 시설에 이용되는 열을 저장하기 위한 열매체에 관한 것으로, 본 연구의 CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방시스템과는 큰 차이가 있음.

3. 논문분석

가. 논문분석 범위

대상국가	미국, 일본, 유럽
논문 DB	NDSL(www.ndsl.or.kr), 국회도서관(www.nanet.go.kr)
검색기간	최근 5년간
검색범위	제목, 초록 및 키워드

나. 논문분석에 따른 본 연구과제와의 관련성

개발기술명	열 및 전기 동시생산 CPV 집광기술	CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방기술	
Keyword	집광기, CPV 모듈	Solar Heating of Greenhouse	
검색건수	26	310	
유효논문건수	5	5	
핵심논문 및 관련성	논문명	광도파 원리의 평면형 태양광 집광기 설계를 위한 광학해석	Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV?T) hybrid collector technology
	학술지명	대한기계학회논문집	Renewable and Sustainable Energy Reviews
	저 자	한종호, 김종선, 황철진, 윤경환, 강정진	V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi
	게재년도	2012	2012
	관련성(%)	20%	40%
	유사점	집광기	태양광 및 태양열 이용 시스템
	차이점	본 논문은 광도파로 원리를 기반으로 한 간단하면서 생산이 용이한 새로운 개념의 평면형 집광기에 관한 것으로, 본 연구의 점 집광기와는 형태와 집광방법에 차이가 큼.	본 논문은 일반 실리콘 태양전지(PV) 모듈 평판형 집광기 후면에 열매체 유동관을 설치하여 태양광 발전과 태양열 회수를 목적으로 한 연구로, 본 연구의 CPV 태양광 집광기에 의한 태양광 발전과 열 회수 방법에 큰 차이가 있음.
핵심논문 및 관련성	논문명	태양열 집광관의 반사율 변화 연구	Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse
	학술지명	한국태양에너지학회 논문집	Biosystems Engineering
	저 자	이현진, 김종규, 이상남, 강용혁, 이성욱, 박문희	P.J. Somneveld, G.LAM Swinkeis, G.P.A. Bot, G. Flamand
	게재년도	2010	2009
	관련성(%)	30%	25%
	유사점	집광기	태양에너지 온실난방
	차이점	본 논문은 태양열 집광기의 반사율 측정을 목적으로 한 것으로, 본 연구의 점 집광기와는 형태와 집광방법에 차이가 큼.	본 논문은 탱야광을 유효하게 집광하여 전기를 생산할 수 있도록 온실형태 설계에 관한 연구로, 본 연구의 CPV 태양광 집광기에 의해 열 및 전기를 동시에 생산하여 온실 난방에 이용하는 시스템과는 큰 차이가 있음

개발기술명		열 및 전기 동시생산 CPV 집광기술	CPV 집광기를 이용한 농업시설 난방기술
Keyword		집광기, CPV 모듈	Solar Heating of Greenhouse
검색건수		26	310
유효논문건수		5	5
핵심논문 및 관련성	논문명	실내조명용 화이버 광학 집광기의 성능에 관한 실험적 평가	Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating
	학술지명	한국태양에너지학회 논문집	. Solar energy
	저자	한현주, 김정태	Benli, H. Durmus, A.
	게재년도	2008	2009
	관련성(%)	30%	25%
	유사점	집광기	태양열 온실난방
	차이점	본 논문은 화이버 광학 집광기를 적용한 자연채광 시스템의 성능에 관한 연구로, 본 연구의 집광기와는 형태와 집광 방법에 차이가 큼.	본 논문은 평판형 태양열집열기에 의해 집열된 열을 PCM에 저장하여 온실난방에 이용하는 연구로, 본 연구의 온실 난방을 위한 태양에너지 이용기술과 큰 차이가 있음.
핵심논문 및 관련성	논문명	CPV 냉각용 열분산기 모듈의 열성능에 관한 실험적 연구	Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming
	학술지명	한국태양에너지학회 논문집	Renewable & sustainable energy reviews
	저자	도규형, 한용식, 최병일, 김명배	Panwar, N.L. Kaushik, S.C. Kothari, S.
	게재년도	2011	2010
	관련성(%)	40%	20%
	유사점	CPV 모듈 냉각기능	온실의 태양열 이용
차이점	본 논문은 집광형 태양전지 모듈의 냉각을 위한 열분산기의 열성능을 석한 논문으로, 본 연구의 집광기의 CPV 모듈 냉각방법과는 차이가 큼.	본 논문은 그린하우스의 구조에 따른 태양열 이용효율을 분석한 연구로, 본 연구의 온실 난방을 위한 태양에너지 이용기술과 큰 차이가 있음.	
핵심논문 및 관련성	논문명	구형렌즈를 적용한 CPV 모듈 발전성능 분석에 관한 연구	A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems
	학술지명	전기학회논문지	Renewable and Sustainable Energy Reviews
	저자	정병호, 김남오, 이강연	Onder Dzgner, Arif Hepbasli
	게재년도	2010	2007
	관련성(%)	30%	20%
	유사점	CPV 모듈 발전	태양열 이용기술
차이점	본 논문은 구형렌즈를 적용한 집광형 태양광 발전 모듈의 성능을 분석에 관한 연구로, 본 연구의 CPV 집광기의 집광방법과는 차이가 큼.	본 논문은 시설 냉난방용으로 태양열을 보조 열원으로 한 지열 히트펌프에 관한 연구로, 본 연구의 온실 난방을 위한 태양에너지 이용기술과 큰 차이가 있음.	

4. 제품 및 시장 분석

가. 국내 제품생산 및 시장 현황

(1) 태양열

- 우리나라의 태양열 에너지 보급현황을 살펴보면 1994년도 이전까지의 태양열 이용분야는 저온 분야로 가정에 온수를 공급할 목적으로 자연형 온수급탕 분야에 집중 보급되어 왔으며, 이들은 비교적 저렴한 가격으로 집열과 축열을 동시에 만족하는 batch형 태양열 온수기와 평판형 집열기를 사용한 자연순환식 태양열 온수기 및 작동유체의 증발잠열을 이용한 heat pipe식 태양열 온수기 등이 있음(연구보고서, 2011).
- 열매체를 이용한 상변화식 평판형 집열기를 사용한 가정용 온수 시스템이 98%를 차지하고 있고 국내에 약 12개의 업체가 생산 보급하는 상태이나, 상변화식 진공관형 태양열집열기를 사용한 시스템의 경우 외국에서 전량 수입하여 시공하는 대리점 수준의 업체가 대부분임(연구보고서, 2011)..
- 국내에서의 태양에너지 활용시스템의 실용화는 가정용 태양열 온수기를 제외한 모든 분야에서 지극히 미미한 실정으로, 단위 면적당 이용효율을 높이기 위한 태양열 집광기, 태양연못(Solar Pond) 등이 있으나 이러한 중·고온용 태양열 집열기의 실용화는 실증단계에 있음(연구보고서, 2011).

(2) 태양광

- 최근 2~3년간 국내 기업들은 태양광 산업에 대규모 투자를 진행 중에 있으며, 2008년 기준 국내의 태양전지 생산능력은 166MW/년이며 생산라인 증설 및 폴리실리콘 생산 등 기업별로 대규모 투자계획을 발표하였음(2009, 그린에너지 전략 로드맵)
 - * 동양제철화학: 2조 2천억 투자 2010년 폴리실리콘 연 26,500톤 생산
 - * 현대중공업: 2008년 5월 30MW 태양전지 생산라인 완공, 2012년 1GW 증설계획
 - * 한국철강: 2008년 5월 30MW 태양전지 생산라인 완공, 2012년 1GW 증설계획
 - * LG전자: 50MW 생산계획 향후 120MW로 확대 예정
- 국내의 태양광 기반 분야인 반도체·정밀화학에서 세계적 기술을 보유 하였음에도 불구하고 세계 태양광 시장 점유율은 0.7%에 불과(일본 22%, 중국 21%, 독일 13%, 미국 7%)(2009, 그린에너지 전략 로드맵)

- 화석연료나 타 신재생에너지원 대비 경제성이 떨어지는 태양광발전의 경우 정부의 산업육성 의지와 발전차액 지원제도와 같은 지원정책으로 시장의 성장이 이루어져 왔으며, 우리나라의 경우 발전차액 지원제도의 한계용량인 100MW가 초과됨에 따라 2008년 10월 1일부터 발전용량을 세분화하여 개선된 제도를 운영하고 있음.
- 세계최고의 CPV기술 보유 및 세계최초로 CPV기술의 상업화에 성공한 독일 콘센트릭스솔라(CXG)의 Korea & Grobal EPC Partner로의 전략적 제휴를 통하여 (주)스카이뉴팜은 CPV 방식에 의한 태양광발전시장 진출로 향후 급성장할 CPV 방식 태양광발전에 관한 국내외 시장을 선점 및 실적을 기대하고 있음 (<http://v.daum.net/link/13165917>).

나. 국외 제품생산 및 시장 현황

(1) 태양열

- 미국의 태양열집열기 사용지역을 살펴보면 높은 일사량을 갖는 캘리포니아, 플로리다에 집중되어 있으며 지역적 특성 및 미국인의 생활문화에 따라 저온용 집열기를 사용하여 Pool Heating, Hot Water 및 Space Heating에 많이 적용되어 왔으나 Process Heating에 적용하기 위한 연구개발이 정부의 적극적인 지원하에 여러 각도로 이루어지고 있음(연구보고서, 2011).
- 영국의 경우 대체에너지원 중의 하나인 태양열 이용효율 극대화를 위한 진공관형 태양열집열기의 실용화 현황을 살펴보면 Thermomax사에서는 수년동안 다공성 벽이 없는 히트파이프를 사용한 진공관형 태양열집열기를 개발하였고, 각국에 엄선된 대리점을 통해 판매하고 있음(연구보고서, 2011).
- 일본에서는 NEG사가 집열 저탕형<SP4-2400>과 흰 튜브형<DP6-2800>의 집열기 개발 및 판매를 통해 급탕 뿐만 아니라 흡수식 냉방시스템과 연결하여 냉·난방에 적용하고 있음(연구보고서, 2011).
- 최근에 태양열 분야에서 급부상하고 있는 나라는 바로 중국이며, 이 중에서 Sunda 회사의 주요 생산품은 평판형 집열기와 진공관형 집열기 및 태양열온수기, Heat pipe 전기히터 등이 있으며, 이 회사는 독일의 Daimler-Benz Aerospace사와 합작회사로 1996년 6월에 설립되어 독일과의 3년간 국제공동연구를 바탕으로 진공관형 집열기를 연간 50만대 생산하는 공장을 완성하여 생산 및 판매중임(연구보고서, 2011).
- 유럽의 기술개발 및 보급의 핵심은 태양열 난방 및 온수기, 자연형 태양열 등이고, 수출을 목적으로한 태양열 발전 등의 개발이 지속적으로 추진 중임(JOULE 프로그램 내, THERMIE 프로그램)

- 유럽의 경우 현재 그리스 태양열집열기 총설치규모는 약200만 m^2 인데, 독일, 오스트리아, 그리스가 유럽 전체 판매량의 80%를 점유(연구보고서, 2011).
- 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^2)형 엔진개발을 완료함(연구보고서, 2011).

(2) 태양광

- 2010년 세계 태양광시장의 수요(1~9월)는 2009년 동기(3.56GW) 대비 약 196% 성장한 10.9GW를 기록했으며 이와 더불어 지난해 세계 태양광시장의 전체 규모가 16.3GW에 이를 것으로 전망 하고 있고, 이 가운데 유럽 시장은 78%의 점유율을 차지하고 있음(2011. 01. 03, 에너지신문).
- 공급 측면에서는 중국 제조사가 2010년 3분기 전체 셀 시장에서 66%를 차지했으며, 이는 중국의 지속적 시장 점유율 확대에 따라 작년 동기간의 50% 점유율에서 16% 증가한 수치로, JA Solar는 3분기에 셀 출하량에 있어 가장 높은 순위를 기록 했고, 상위 12개사 중 8개사를 중국 및 대만 제조사들이 차지하고 있음(2011. 01. 03, 에너지신문).
- 태양전지는 환경문제, 석유 가격의 상승 등의 영향을 받으면서 성장해왔으며, 2030년에는 태양전지의 시장이 2,000조원 규모로 성장할 것으로 전망됨(2007, 한국과학기술정보연구원).
- 실리콘 태양전지는 주로 주택용 태양전지가 개발되었으며, 2005년에는 세계 연간 생산량은 250만kW에 이르고 있고, 지금까지의 태양전지는 90% 이상이 결정질 실리콘에 의해 생산되었음(2007, 한국과학기술정보연구원).
- 향후에는 다음과 같이 박막(Si, CIGS) 및 차세대 태양전지 점유율이 증가할 것으로 전망됨(2009, 그린에너지 전략 로드맵).
 - * 결정질: 박막: 차세대 = 9:1:0(2007) → 3:1:0(2012) → 1:1:1(2030)
- Suntech(中)을 필두로 GW-규모 업체들이 등장하는 가운데 선도 기업들 간의 규모의 경제를 통한 시장 경쟁이 본격화되고 있음(2009. 그린에너지 전략 로드맵).
 - * Suntech(中) :2008년 1GW 달성후 고효율 태양전지 라인으로 전환
 - * Sharp(日) : 2010년 결정질계 0.7GW, 박막계 1GW 규모로 증설
 - * Q-cell(獨) : 2010년 1GW(박막 500MW 포함)로 증설
- 미국 태양에너지의 가장 큰 성장 동력원은 정부 주도하의 고비용 PV(태양광발전) 시스템 개발 덕분이었으며, 미국 신재생에너지발전 의무비율할당제(RPS)와 2009년 발효된 미국 경제회복 재투자 법에 의해 제공된 경제 자극 패키지는 향후 태양 에너지가 미래 동력 에너지로 기대되고 있음.

- 유럽 정부 또한 재생 가능한 에너지 산업을 지원하기 위한 재생 에너지 법령을 통과 시켜왔으며, 이러한 장려정책은 독일, 스페인, 이탈리아, 프랑스, 스위스, 포르투갈과 같은 국가에서 태양광 PV 생산에너지를 위한 발전차액지원제도(FIT)를 포함함 (<http://kidd.co.kr/news/146217>).

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.