

발간등록번호

11-1541000-000872-01

PTC형 태양열집열기를 이용한 에너지 절약형 농산물  
건조장치 개발

Development of the Drying System with Energy  
Saving for the Drying of Agricultural Products  
Using Parabolic Trough Collector

연구기관

강원대학교

농림수산식품부

## 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “PTC형 태양열집열기를 이용한 에너지 절약형 농산물 건조장치 개발에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2011년 9월 2일

주관연구기관명 : 강원대학교

주관연구책임자 : 이 귀 현

연 구 원 : 김 대 현

연 구 원 : 김 성 진

연 구 원 : 홍 이 수

연 구 원 : 김 동 준

연 구 원 : 홍 선 일

연 구 원 : 이 명 환

연 구 원 : 이 원 구

연 구 원 : 정 상 우

연 구 원 : 신 현 민

연 구 원 : 신 준 호

연 구 원 : 박 소 라

연 구 원 : 현 준 호

연 구 원 : 이 승 원

# 요 약 문

## I. 제 목

PTC형 태양열집열기를 이용한 에너지 절약형 농산물 건조장치 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라의 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가추세로 '98년 통계에 의하면 국내 소비 에너지 사용량의 97%이상이 수입에 의존하고 있는 실정이다. 현재 우리나라는 에너지 소비 세계 10위이고, 석유소비는 세계 7위, 에너지 소비 증가율은 OECD가입국 중 1위이다. 우리나라는 석유가 생산되지 않아 전체사용량의 97.2%를 수입에 의존하고 있고, 2005년 기준으로 총 수입액의 26%에 달하는 667억 달러를 에너지 수입에 사용했다. 연간 수조원이 대기로, 도로 위로 사라지고 있다. 자원의존도가 큰 석유가 감소됐을 경우 경제에 미치는 영향은 엄청나며 에너지원의 감소는 인류발전의 엄청난 퇴보를 가져올 것이 분명하다. 원자력에너지가 국내 총 전력생산량의 약 38%를 차지하고 있어 발전효율성 측면을 고려한다면 매우 효율적인 에너지원이어서 든든한 면이 있다. 하지만 쓸데없이 낭비되는 에너지가 증가된다면 원자력도 한계성을 드러낼 수밖에 없다. 또한 우리나라는 방사성폐기물처분장 부지 선정을 두고 지난 19년간 부안 사태 등 심각한 사회적 갈등을 겪은 바 있다. 전 세계 석유 매장량은 1조2천128억 배럴로 추정되며, 석유채취기술의 증가로 약간의 변동은 있겠지만 석유 소비량이 약 289억 배럴(2001년 기준)이므로 약 41년 정도 사용 가능한 양이다.

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 하여 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하였다. 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 에너지 자원 확보는 지속적으로 대두될 문제라는데 심각성이 크며, 이 때문에 관계 정부당국에서는 면세유 확대공급, 대체 에너지원 개발, 에너지 절약형 설비 시스템 구축 등 다각적인 노력을 강구하고 있다. 그러나 이러한 노력은 단기적이어서는 안 되며, 장기적이고, 항구적인 농업에너지 수급대책이어야 한

다. 이를 위해서는 근본적으로 대체에너지 개발, 에너지원의 다양화, 부존자원 이용의 극대화가 이루어지지 않으면 안 된다.

우리나라는 지리적인 위치와 계절적 기후조건이 연중 태양에너지를 충분히 공급 받을 수 있으며 특히 동절기에는 날씨가 건조하고 맑아 태양 복사량이 많은 편이어서 태양열 이용에 매우 유리하다. 그러므로 대체에너지로서 태양열 이용분야의 실용기술을 개발하여 농업에너지원으로의 확대 및 보급이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 PTC(Parabolic Trough Collector)형 태양열집열기, 축열조, 보조열원부, 열교환기, 태양추적장치 등으로 구성된 에너지 절약형 태양열 농산물 건조장치를 개발하는데 있다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

#### 1. 소형 PTC 태양열집열 시스템 개발

- 가. 실험용 PTC 태양열집기 설계 및 제작
- 나. 흡수관이 PTC 태양열 시스템 성능에 미치는 영향분석
- 다. 실험용 PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델
- 라. PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델 검증 및 성능분석

#### 2. 실증 실험용 PTC형 태양열 집열 시스템 개발

- 가. PTC형 태양열집열기 설계 및 제작
- 나. 태양추적 제어장치 설계 및 제작
- 다. 축열조 및 열매체 보충탱크 설계·제작
- 라. 차온 제어장치 설비
- 마. PTC형 태양열 집열 시스템 성능분석
- 바. PTC형 태양열 집열 시스템 열전달 모델 시뮬레이션

#### 3. 태양열 건조시스템 개발

- 가. 태양열 건조장치 설계 및 제작
- 나. 건조기 내 온습도 및 풍속 분석
- 다. PTC 태양열 건조장치에 의한 농산물 건조 특성 분석

#### 4. 태양열 건조장치의 건조성능 및 경제성분석

## IV. 연구개발 결과

### 1. 소형 PTC 태양열집열 시스템 개발

#### 가. 실험용 PTC 태양열집기 설계 및 제작

PTC 태양열집열기의 가장 중요한 부분인 반사판은 태양광을 집광부로 반사시켜 태양열을 선으로 집열하는 부분으로 PTC 반사판을 후면에서 지지할 수 있도록 지지대로 이용하기 위해 양면이 코팅된 베니어합판(두께: 12 mm)을 CNC로 정밀 가공하였다. PTC 태양열집열기의 림각은 90°로 하였으며, 반사판의 호의 길이는 596.8 mm이고, 지지대 받침판의 크기는 가로 610 mm, 높이 280 mm로 제작하였다. 가공된 베니어합판 및 사각파이프로를 이용한 지지대 위에 PTC 반사판을 설치하고, 수광부인 파이프를 축점인 중심선에 설치하여 소형 PTC 태양열집열기를 제작하였다.

#### 나. 흡수관이 PTC 태양열 시스템 성능에 미치는 영향분석

제작된 소형 PTC 태양열집열 시스템의 효율에 미치는 흡수관의 재료(아연도금강, 스테인레스, 또는 동파이프), 흡수관의 흑색 코팅 유무, 유체순환 유량 및 PTC 흡수관 외부에 폴리카보네이트 튜브(PC Tube)설비 유무가 PTC 태양열시스템의 성능에 미치는 영향 및 축열조의 축열성능을 분석하였다. 흡수관의 재료가 소형 PTC 태양열집열 시스템의 효율에 미치는 영향 분석결과 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 것이 아연도금강관을 흡수관으로 사용하는 것 보다 PTC 태양열 집열 시스템의 효율에 미치는 영향이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 것이 동관을 흡수관으로 사용하는 것 보다 PTC 태양열 집열 시스템의 효율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 유량의 크기가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 영향 분석결과 흡수관 내를 순환하는 유체의 유량이 18 l/min 일 때가 9 l/min 및 13.5 l/min 경우 보다 우수한 것으로 나타났다. 도색 스테인리스관에 PC관을 설비한 집열관을 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템은 스테인리스관을 도색함으로 인한 복사열의 흡수율을 높이는 효과와 PC(폴리카보네이트)관 설비로 인해 대기로의 열손실을 줄이는 효과가 추가되어 PTC 태양열 집열 시스템의 효율을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 소형 PTC 집열시스템 축열조의 축열 성능 분석결과 축열조의 10분간 축열량 평균값은 140.01 kJ이 었으며, 태양 일사량 값의 변화에 따라 130 ~ 160 kJ의 범위에서 대체로 균일한 축열량을 나타내었고, 3시간 동안의 총 축열량은 2,660.23 kJ인 것으로 나타났다.

#### 다. 실험용 PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델

본 연구에서는, PTC의 시뮬레이션을 통하여 실험에서 얻어진 결과와 비교 분석하여 PTC 성능을 분석하는데 그 목적이 있다. 분석하는 과정에서 흡수관, 작동유체 및 저장탱크는 각각의 독립된 에너지 평형 방정식으로 고려되었다. 작동유체와 흡수관의 온도는 실험값과 예측값이 유사한 흐름을 나타내었고, 저장 탱크 내 유체의

온도변화는 일정한 유속에서 탱크의 용량이 커지면서 온도 상승이 감소하였다. 작동 유체와 흡수관의 측정값과 예측값의 차이가 발생하였는데, 이는 실험에 이용된 기상 데이터와 각종 입력 변수들 중에 상당 부분이 가정에 의한 것에서 기인하였다고 볼 수 있다. 모델링의 검증을 위해서는 직접 PTC를 설치하여 실험을 통한 측정값과 시뮬레이션을 통한 예측 값의 비교를 통한 정확한 분석이 수행되어야 할 것이다.

#### 라. PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델 검증 및 성능분석

PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델검증 결과 흡수관 내를 흐르는 작동유체의 온도는 실험값과 예측값이 유사한 경향을 나타내었고, 축열조 내 유체의 온도변화도 역시 서로 근접한 결과를 나타내었다.

## 2. 실증 실험용 PTC형 태양열 집열 시스템 개발

### 가. PTC형 태양열집열기 설계 및 제작

본 연구에서는 미리 설정한 립각( $73^\circ$ )에 맞게 초점거리를 정한 후 포물선의 식에 따라 곡율을 계산하여 PTC 반사판을 후면에서 지지할 수 있도록 반사판이 부착될 지지대의 설계하여 레이저 가공하였다. 또한 반사판 지지대 양쪽 끝에 구조용 스테인리스 사각파이프( $20 \times 20$  mm)를 고정하여 반사판의 초점에 맞게 흡수관을 고정할 실린더를 설치하고 흡수관을 설치하였다.

### 나. 태양추적 장치 설계 및 제작

본 연구에서 태양을 추적하기 위한 기본 시스템은 태양 고도 각 추적을 위해 Linear Actuator를 사용하였으며, 방위각 추적은 Slew Drive를 이용하여 태양추적 장치를 제작하였다. 태양추적장치의 Linear Actuator와 Slew Drive는 2-축 태양추적센서의 신호에 의해 작동하는 광센서식이며, 구동 방식으로는 양축형 추적 장치로 Azimuth controller와 Altitude controller로 구동이 된다. Altitude controller는 DC모터를 사용한 전동 실린더를 이용하여 고도를 조절하고, Azimuth controller는 DC모터를 사용해 방위를 조절하게 되어있다.

### 다 축열조 및 열매체 보충탱크 설계 · 제작

본 연구에서 설치된 축열조는  $1500\ell$ 의 용량이며, 직경  $1,060$  mm 및 높이  $1700$  mm의 내통은 스테인리스강(STS316L)으로 제작되었고, 내통의 외부는  $120$  mm 두께의 폴리우레탄폼으로 단열되어 있으며, 외부 케이스는 칼라강판으로 제작되었다. 축열조 내에는 상부와 하부에 2개의 코일형 열교환기가 설치되어 있으며, 상부의 코일형 열교환기는 냉수를 열교환기 내로 순환시켜 축열조 내의 가열된 물과 열교환에 의해 온수를 생산하여 이용할 수 있게 한 부가적인 장치이다. 또한 하부의 코일형 열교환기는 PTC 태양열집열기의 흡수관으로부터 가열된 열매체를 축열조 내

열교환기로 순환시켜 축열조 내에 저장된 물을 가열하고 냉각된 열매체는 다시 PTC 태양열집열기의 흡수관을 순환하면서 태양복사열을 집열하여 축열조 내 물을 가열하여 축열하는 역할을 한다. 열매체 보충탱크는 내통의 지름이 260 mm이고, 높이는 750 mm인 40 ℓ의 용량을 갖는 스테인리스강(STS316L)으로 제작되었다. 보충탱크 내통의 외부는 20 mm 두께의 폴리에탄폼으로 단열되어 있으며, 외부 케이스는 칼라강판으로 제작되었다.

#### 라. 차온 제어장치 설비

차온 제어장치는 자동 온도조절 제어기에 2개의 온도센서를 부착하여 온도차를 검출하고 MC(마그네틱 커넥터)의 릴레이 접점을 이용하여 순환펌프 동작을 제어할 수 있도록 구성되어 있다. 기본적인 연결은 흡입 온도 센서는 흡수관의 출력 부분에 설치하고 배출온도 센서는 축열조에서 열교환이 이루어진 다음 순환펌프로 연결되는 부분에 설치하여 태양열에 의한 집열 온도와 축열조에서 열 교환이 이루어진 후의 온도를 비교하여 8℃ 이상 차이가 나면 순환펌프와 연결된 릴레이를 동작시켜 열매체를 순환시키고 흐리거나 저녁 시간이 되어 집열 효율이 떨어져 온도차가 4℃ 이하로 줄어들면 순환펌프의 동작을 멈추도록 구성하였다.

#### 마. PTC형 태양열 집열 시스템 성능분석

본 연구에서 태양열집열기의 흡수관과 축열조 내의 열교환기를 순환하는 열매체로 물을 사용하였으며, 축열조 내에 물을 1 ton 채우고 실험을 수행하였다. 제작된 PTC형 태양열 집열기의 일일 열성능 분석을 위해 열매체의 순환유량을 5.5 ℓ/min으로 설정하여 성능실험을 수행하였다. 또한 집열기의 효율에 중요한 영향을 미치는 요소들 중에는 열매체 유입온도와 열매체 순환유량이다. 따라서 열매체의 순환유량을 5.5 ℓ/min으로 설정하고, 열매체 유입온도를 25℃에서 60℃까지 범위에서 변화시키면서 열매체 유입온도가 집열기의 효율에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 집열관 입구의 열매체 유입온도를 약 25℃로 일정하게 유지하고 집열관 내를 흐르는 열매체 유량을 2 ℓ/min, 4 ℓ/min 및 6 ℓ/min로 변경하면서 열매체 순환유량이 집열기의 효율에 미치는 영향을 조사하였다. 성능분석 결과 일사량의 변화에 따라 흡수관 입·출구의 열매체 온도차가 비례적으로 잘 변하며, 일사량의 변화에 따라 집열기의 열성능이 민감하게 변화하여 집열기에서 획득한 열량이 일사량에 비례적으로 잘 변하고 있음을 알 수 있었다. 또한 PTC형 태양열 집열기의 열매체 유입온도 증가에 따른 효율 감소는 평관형 집열기에 비해 열매체 유입온도가 상승함에 따른 효율 저하가 매우 작게 나타난 것으로, 집광형 태양열 집열기의 큰 특징이라 할 수 있다. 본 연구에 사용된 PTC형 태양열 집열기의 최적 열매체 순환유량은 4 ℓ/min로 분석되었다.

#### 바. PTC형 태양열 집열 시스템 열전달 모델 시뮬레이션

PTC형 태양열 집열기에 흡수되는 태양 에너지와 열전달이 이루어지는 시스템의

계는 흡수관, 작동유체 및 축열조로 구성되며, 수학적 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 흡수관의 두께 및 길이 방향의 온도 구배는 동일하고, 작동유체는 흡수관 내부를 액체 상태로 가득 채워서 흐른다고 가정하였다. 작동유체의 질량유량은 항상 일정하고, 흡수관으로부터의 열전달 현상은 자연대류이며, 태양에너지와 흡수관과의 열전달, 흡수관과 대기사이의 대류와 복사에 의한 열전달, 흡수관과 작동유체간의 대류로 인한 열전달, 저장탱크에서의 열전달 현상에 대한 에너지 평형 방정식을 세웠다. 본 연구에서, 온수 생산을 위한 PTC에서의 에너지 평형 방정식을 시뮬레이션하여 실험결과와 비교·분석한 결과 예측 및 실험 결과는 거의 일치한 것으로 나타났다. 흡수관 및 공기 사이에 설정된 열전달 계수는 예측 및 측정된 온도로부터 표준오차를 최소화함으로써 보정되었다. 보정된 모델은 독립적 실험 데이터의 사용을 통해 검증되었다. 측정 및 예측된 값의 최소, 최대 편차는 보정을 거쳐 각각 0.29%에서 0.26%, 2.04%에서 1.65%로 감소되었다. 이 결과를 통해, 정립된 보정 모델은 PTC형 태양열 집열 시스템의 성능에 있어 향상된 정확성을 예측할 수 있다. 이에, 정립된 보정 모델은 온수 생산을 위한 PTC형 태양열 집열 시스템의 장기간 성능 예측에 대한 모의실험 도구로 활용될 것으로 기대된다.

### 3. 태양열 건조시스템 개발

#### 가. 건조장치 설계 및 제작

PTC형 태양열 집열기에 의해 집열된 축열조 내의 온수를 건조기의 열원으로 이용하기 위하여 이동식 건조장치를 제작하였다. 건조기 벽체는 단열 효과가 우수한 100 mm 두께의 폴리우레탄 판넬을 이용하여 제작하였으며, 크기는 1400×1400×2200 mm(L×W×H)이다. 건조장치는 온도제어 컨트롤러, 열교환기, 보조 열원부(전기히터), 송풍기, 온도 검출기, 시료대, 배습을 위한 환기구, 적산전력계(PS-4형) 등으로 구성되어 있다. 건조장치 내부에는 시료대를 설치하기 위해 5단의 철재 프레임이 설치되어 있고, 각 1단의 프레임 위에 2개의 시료대가 설치되어 총 10개의 시료대가 건조장치 내에 설비되어 있다. 건조장치 외부 벽면은 적산전력계 및 환기구와 컨트롤박스가 설비되어 있다. 건조실 내에는 열교환기가 설치되어 있으며, 열매체가 유동하는 5/16 inch의 동관외부에 알루미늄 핀이 부착된 열교환기는 아연도금 강관 케이스 내에 설비되어 있다. 열교환기의 전열면적은 14.3m<sup>2</sup>이며, 열교환기 바로 뒤에는 보조열원으로 5kW의 전기 히터가 부착되어 있고, 열교환기 앞면에는 66W의 모터에 의해 구동되는 직경 350mm의 팬이 부착되어 있다. 건조실의 건조온도 제어를 위한 제어장치는 마그네틱 스위치 4개(Pump, Heater, Fan, 솔레노이드 밸브 제어용), 온도 릴레이, 타이머 릴레이, 디지털온도보상수정발진기(DTCXO), 누전차단기, 작동 램프 등으로 구성되어 있다. PTC형 태양열집열기에 의해 가열된 열매체는 축열조 내의 열교환기를 순환하면서 축열조 내의 물을 가열하게 되고, 축열조 내의 가열된 온수는 건조기 내의 열교환기를 순환하며 온도가 낮아진 물은 다시 축열조 내로 유입되는 연속 순환과정을 거치면서 건조기 내로 열을 전달하게 된다.

본 연구에서 개발된 태양열 건조시스템은 PTC 태양열집열기, 축열조, 및 건조장치 일체형으로 구성되어 있다.

#### 나. 건조기 내 온습도 및 풍속 분석

건조온도에 따른 건조기 내 상, 중, 하부의 온습도 변화 분석결과 건조온도 40, 50, 60℃에서 각각 온도 변화 폭은 최대 약 5, 4, 3℃로, 사인곡선 형태로 건조온도가 증감하였으나 평균온도는 설정 값과 대체로 잘 일치하였다. 건조온도 40℃에서 상대습도는 최대 약 2%의 변화 폭을 갖고 증감하였으나, 평균적으로 상대습도는 약 11%로 나타났다. 건조온도 50℃ 및 60℃에서 상대습도는 각각 최대 약 1.2% 및 1.0%의 변화 폭을 갖고 증감하였으나, 평균적인 상대습도는 건조온도 50℃에서는 약 7%, 건조온도 60℃에서 약 3.7%로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 설정된 건조온도가 높을수록 건조실 내의 상대습도가 낮아지고, 또한 온도변화 및 상대습도의 변화 폭도 작아지는 것으로 나타났다. 건조실 내 풍속분포 분석 결과 팬과 근접해 있는 최 상층부의 좌우측 시료대 위에서 각각 0.88 m/s 및 0.82 m/s로 나타나, 최하층부의 좌우측 시료대 위에서의 각 풍속 0.49 m/s 및 0.45 m/s보다 큰 것으로 나타났다. 대체적으로 건조기 내 풍속은 상층부일수록 크게 나타났고, 같은 층이라도 우측보다는 좌측 시료대 위에서의 풍속이 다소 높은 것으로 나타났다.

#### 다. PTC 태양열 건조장치에 의한 농산물 건조 특성 분석

본 연구에서는 농산물의 농가 건조시 에너지절약을 위한 유류 대체용으로 PTC형 태양열집열기에 의해 축열된 태양 복사열을 에너지원으로 사용하는 태양열 건조장치에 의한 농산물의 건조특성을 분석하고자 하였다. 열풍건조기를 이용한 농산물 건조특성실험을 위해 사과(Malus pumila MILL) 및 무(Raphanus sativus L.)를 실험재료로 사용하였다. 농산물 건조 특성 분석 결과 건조온도가 높을수록 반 건조시간 및 건조시간이 짧아지는 것으로 나타났고, 같은 건조온도에서는 두께가 두꺼울수록 반 건조시간 및 건조시간은 매우 길어지는 것으로 나타났다. 사과 및 무의 건조곡선은 건조온도가 높을수록 함수율비(MR)의 기울기가 커짐을 나타냈고, 두께가 두꺼울수록 함수율비(MR)의 기울기가 작아짐을 나타냈다. 사과 및 무 모두 건조온도가 높을수록 건조시간이 증가함에 따라 색차( $\Delta E$ )가 증가하는 것으로 나타났다. 모든 건조조건에서 결정계수( $r^2$ ) 값이 0.97이상으로 나타나, 건조시간에 따른 함수율비(MR)가 지수함수로 잘 표현됨을 알 수 있었다. 모든 건조조건에서 사과 및 무 모두 두께가 두꺼울수록 건조상수 K값은 작아지고 A값은 커지는 것으로 나타났으며, 건조온도가 높을수록 A값은 작아지고 K값은 커지는 것으로 나타났다. 또한 사과 및 무 모두 건조온도가 높을수록 수분확산계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 사과 및 무 각각 수분확산계수 값은  $3.96629 \times 10^{-7} \sim 7.08264 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$  및  $3.10773 \times 10^{-7} \sim 4.64735 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 태양열 건조장치의 성능 및 경제성분석

본 실험은 본 연구에서 제작한 PTC형 태양열집열기를 이용해 축열조에 저장된 물을 가열하여 열원으로 이용하는 농산물건조기를 이용하여 건조온도에 따라 소요되는 온수의 양과 적정온도를 구명하였다. PTC형 태양열집열기를 이용해 축열된 온수를 이용하여 건조를 진행 할 경우의 에너지 소모량을 기존의 유류 건조기와 비교하여 에너지 절감 효과에 의한 경제성을 분석하였다. 실험 결과 약 0.58평 정도의 건조기를 내부온도 60℃로 가동시킬 때, 축열조 내 80℃의 온수 120ℓ로 약 180분정도 건조가 가능하다. 동일 한 건조기에서 내부온도를 50℃로 가동시킬 때 80℃의 축열조 온수 120ℓ로는 약 420분 정도 건조가 가능하다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 태양열을 이용해서 매일 60℃의 온수 960ℓ를 80℃까지 가열 할 수 있으며, 온수만을 이용하여 0.58평형 건조기를 60℃로 24시간 가동 할 수 있고, 50℃로 건조시킬 경우 축열조의 온수 411ℓ만 있으면 건조기의 가동이 가능하다고 결론지을 수 있다. 일반적으로 크기 0.5평형 건조기를 기준으로, 연간 20회 건조기를 가동하고, 1회 건조 시 약 30시간 소요되는 것으로 가정하여, 기존의 유류 사용 건조기와 본 연구에서 제작한 PTC형 태양열집열기를 이용한 축열조의 온수를 이용하는 건조기에서 년 간 소요되는 운영비를 계산하면 면세 백등유를 사용하는 건조기의 경우 유류비용으로 연간 1,080,000원이 소요된다. 따라서 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조기는 대량으로 산업화가 이루어진다면, 약 300만원 정도의 제작비용이 소요될 것으로 추정되며, 본 태양열건조 시스템을 3년 이상만 사용하면 유류건조기를 사용하는 경우에 비해 연료비용이 절감되어 태양열 건조기를 설비할 수 있는 비용이 충당됨으로 유류건조기를 사용하는 것보다 훨씬 경제적인 것으로 나타났다.

#### V. 연구성과 및 성과활용 계획

본 연구개발을 통해 PTC형 태양열집열기, 탱양추적장치, 축열조, 건조실 등으로 구성된 에너지 절약형 고효율의 태양열 농산물 건조장치 개발이 완료되었다. 경제성 분석결과 이러한 태양열 건조장치를 3년 이상 사용하게 되면 유류사용 건조기에 비해 경제성이 큰 것으로 분석되었다. 따라서 유류비용의 증가로 에너지난을 겪고 있는 농촌의 건조설비 열원으로 태양열 대체에너지를 이용함으로써 농업에너지 난을 다소나마 해소할 수 있을 뿐만 아니라 정부의 적극적 지원 하에 PTC형 태양열 집열기를 이용한 건조장치의 보급을 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 과제를 통해 PTC형 태양열집열기 및 이를 이용한 건조장치의 자체 설계기술과 Know-How 확보가 가능하여 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치를 기업에 기술 이전할 계획이다. 또한 기술이전 기업체의 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치의 자체생산 기술을 구축케 하여 기업체의 주 생산기종이 되도록 추진할 계획이다. 본 연구개발을 통해 소규모의 태양열 건조장치를 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획이며, 본 기술개발에 의해 개발된 태양열 건조장치는 신기술인증 획득을 통해 국가지원 하에 농가보급의 극대화를 추진할 계획이다.

## SUMMARY

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 solar drying system with the parabolic trough collector (PTC) for energy saving in the drying of agricultural products. The results were obtained as follows:

### 1. Development for the solar collecting system of lab scale with the PTC

#### (1) Design and construction of experimental solar collector with the PTC

Parabolic trough solar collector constructed as lab scale was composed of parabolic trough refractor, absorber tube, and supporter. Rim angle of parabolic trough solar collector is  $90^\circ$ , and the arc length of refractor is 596.8 mm. An absorber tube was installed at the focus of reflector.

#### (2) Analysis for performance of the PTC system according to absorber type

Stainless tube as an absorber had better effects on the performance of the PTC system in compared with copper tube. However, Stainless tube coated in black had better effects on the performance of the PTC system in compared with it without coating. Also, absorber tube with polycarbonate (PC) tube was better than it without PC tube on the performance of the PTC system. An absorber of stainless tube coated in black with PC tube was the best one on the performance of the PTC system among various absorber types.

#### (3) Simulation model of the PTC system

This study was conducted to simulate and analyze the performance of a parabolic trough solar collector. Working fluid in the storage tank is pumped and heated by collected solar radiation passing through the absorber pipe and goes back to the storage tank. This heated working fluid can be reached up to  $200^\circ\text{C}$  depending on the weather conditions and a system composition and can be used as a thermal energy source. The simulation of the PTC showed that the calculated working fluid temperature reached  $160^\circ\text{C}$  at 4 PM. The predicted results against experimental data were compared to verify the performance of

the PTC. The experimental data were used from the previous study by Eskin (1988). The simulated results were agreed well with the measured values. The dominant factors influencing working fluid temperature are the solar radiation, the size of a solar reflector, and flow rate. Considering unchangeable solar radiation, the size of the reflector and flow rate should be the main factors to achieve target fluid temperature.

#### (4) Simulation and performance analysis of a parabolic trough solar collector

This work presents the simulation and model validation of a lab scale parabolic trough collector (PTC) for water heating system. The PTC simulation was performed using energy balances and heat transfer relationships and the developed model was compared with the experimental results. The PTC was continuously operated for 72 hours. The temperature of the water in the storage tank was increased from 33.5°C to 63.6°C within the test period. The average beam radiation was 495.11 W/m<sup>2</sup> during the collection period (daylight hours) and the instantaneous efficiency of collector was 60%. Significant amount of heat loss was noticed from the storage tank. The predicted temperatures of the water in the storage tank were in good agreement with the measurements.

## 2. Development for the solar collecting system of real size with the PTC

### (1) Design and construction of solar collector with the PTC

Parabolic trough solar collector constructed as real size was composed of parabolic trough refractor, absorber tube, and supporter. Rim angle of parabolic trough solar collector is 73°, and the arc length of refractor is 2450.4 mm. Also it has parabola length of 1,868 mm and parabola height of 422.8 mm. An absorber tube with stainless tube inside vacuumed glass was installed at the focus of reflector.

### (2) Design and construction of solar tracker

Solar tracker was constructed with the linear actuator for tracking an altitude angle and the slew drive for tracking an azimuth angle. Azimuth and altitude controllers of solar tracker are operated by the signal of solar tracking sensor with dual axis.

### (3) Design and construction of water storage tank and supplemental tank of heating medium

Storage tank with the capacity of 1,500 ℓ was constructed as stainless

container insulated with polyurethane of 120 mm thickness on outside wall. Heat exchanger was installed inside the storage tank. The water in storage tank is heated by the working fluid as heating medium circulating inside the heat exchange and absorber tube of the PTC. Heating medium is stored in the supplemental tank, and it is supplied into the absorber tube when it is needed for making up.

#### (4) Construction of temperature difference controller

Temperature difference controller was constructed to control the fluid circulation pump by detecting the difference of outlet fluid temperatures of an absorber tube of the PTC and the heat exchanger in the storage tank. If the temperature difference is more than 8°C, the pump is operated. However, the pump is stopped in the case of the temperature difference below 4°C.

#### (5) Performance analysis of solar collecting system with the PTC

In an experiment for the performance analysis of solar collecting system with the PTC, water was used as working fluid for heating medium which is circulating inside an absorber tube and heat exchanger. Also water of 1,000 ℓ was filled up in the storage tank. Various flow rates and absorber inlet temperatures of heating medium were investigated for the effects on the performance of solar collecting system with the PTC. The flow rate of heating medium circulating inside an absorber tube and heat exchanger was varied as 2 ℓ/min, 4 ℓ/min, and 6 ℓ/min. Absorber inlet temperatures of heating medium were also varied from 25°C to 60°C with constant flow rate of 5.5 ℓ/min. Solar collecting efficiency was decreased according to an increase of absorber inlet temperatures of heating medium. However, the degree of efficiency decrease is very small in compared with that of evacuated solar collector. Also, the optimum flow rate of heating medium circulating inside an absorber tube and heat exchanger was presented as 4 ℓ/min.

#### (6) Simulation model of the PTC system

This work studies the simulation of a parabolic trough solar collector (PTC) for water heating system. The mathematical model was simulated, compared with the experiments and calibrated for the better results. The model was calibrated by reducing RMSE (Root mean square error) values. Calibration was performed on the convective heat transfer coefficient between the absorber pipe and the ambient air. The maximum, minimum and mean deviation between the

measured and simulated results were only 0.9°C, 0.09°C and 0.31°C respectively in the calibrated model. The temperature of water was increased from 33.7°C to 48°C in 12 hours of experimental time span. The instantaneous efficiency of the collector was calculated as 70%. The simulation results showed good agreement with the experimental results. The calibrated model was better fitted with the experimental model.

### 3. Development of solar drying system using the PTC

#### (1) Design and construction of solar drying system

Drying chamber was equipped with controller, heat exchanger, auxiliary heater, fan, temperature sensor, tray, ventilating hole, and electric power wattmeter. Heated water inside storage tank is circulated into the heat exchanger with heating air inside the drying chamber. Heat transfer area of heat exchanger is 14.3 m<sup>2</sup>. Fan of 350 mm diameter which, is operated with the motor of 66 W is attached in front of the heat exchanger. An auxiliary heater of 5 kW is also fixed at the rear of heat exchanger. Solar drying system which was designed and constructed in this study is composed of the PTC, water storage tank, and drying chamber.

#### (2) Analysis of temperature, relative humidity and air velocity inside drying chamber

Temperatures were measured at three positions of each top, middle, bottom part of drying chamber. Humidity was also measured at a center inside drying chamber. Air velocity was measured at each two positions for top, middle, and bottom parts inside drying chamber. The variation of temperature was 5, 4, and 3°C for each setting temperature of 40, 50, and 60°C. At the setting temperature of each 40, 50, and 60°C, relative humidity inside drying chamber was 11, 7, and 3.7% with each variation of 2, 1.2, and 1.0%. Air velocity was each 0.88 and 0.82 m/s, 0.51 and 0.49 m/s, and 0.49 and 0.45 m/s at left and right sides of each top, middle, and bottom position inside the drying chamber. Air velocity was greater values at left part and higher position rather than right part and lower position inside the drying chamber.

#### (3) Drying characteristics of agricultural products with the PTC solar drying system

Drying characteristics of apple and radish were investigated with using the PTC solar drying system. Apple and radish were sliced into the thickness of 1,

2, and 3 mm, and dried at the drying temperature of 50, 60, and 70°C. Weight of drying sample was measured at constant time interval during drying period to analyze the change of moisture content. Equilibrium moisture content was lowered, and half and total drying times were shortened with increasing the drying temperature for all of apple and radish slices. Color difference ( $\Delta E$ ) were increased with increasing the drying temperature for all of apple and radish slices. Moisture ratio (MR) with drying time was well presented as an exponential function. The thermal diffusivity was increased with increasing the drying temperature, and it was at the ranges of  $3.96629 \times 10^{-7} \sim 7.08264 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/hr for apple and  $3.10773 \times 10^{-7} \sim 4.64735 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/hr for radish.

#### 4. Analyses for the performance and the economic values of the PTC solar drying system

Suitable amount and temperature of water inside the storage tank were determined according to drying temperature. Energy needed for drying by using heated water inside storage tank was compared with that consumed by general dryer using kerosene for analyzing economic values of the PTC solar drying system. Water of 960 ℓ at the temperature of 60°C inside storage tank can be heated daily into 80°C by using the PTC. This heated water of 960 ℓ at the temperature of 80°C can be used for drying at the temperature of 60°C for 24 hours. Also, heated water of 411 ℓ at the temperature of 80°C is enough for drying at the temperature of 50°C for 24 hours. The results of analysis for an economic value showed that the PTC solar drying system has great benefit, if it can be used above three years in compared with the general dryer using kerosene.

## CONTENTS

Chapter 1 Concepts of research project .....	17
Section 1 Objectives and necessity of research .....	17
Chapter 2 Present status of research in Korea and foreign countries .....	23
Section 1 Research status in Korea .....	23
Section 2 Research status in foreign countries .....	24
Section 3 Position of study results on the status of research in Korea and foreign countries .....	26
Chapter 3 Contents and results of research .....	27
Section 1 Development of solar collecting systems of lab scale with the PTC .....	27
Section 2 Development of solar collecting systems of real size with the PTC .....	54
Section 3 Development of solar drying system .....	92
Section 4 Analyses of performance and economic values of solar drying system .....	114
Chapter 4 Achievement and contribution .....	120
Section 1 Achievement of research purpose .....	120
Section 2 Contribution to related fields .....	121
Chapter 5 Plane for the practical use of research results .....	122
Section 1 Plane for the practical use and industrialization .....	122
Section 2 Supply of technical and political references .....	123
Chapter 6 Compilation of scientific information from foreign countries .....	124
Section 1 Solar concentrating technology .....	124
Section 2 Solar tracking technology .....	126
Section 3 Heat storing technology .....	127
Chapter 7 References .....	130

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	17
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 .....	17
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	23
제 1 절 국내 기술개발 현황 .....	23
제 2 절 국외 기술개발 현황 .....	24
제 3 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 .....	26
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	27
제 1 절 소형 PTC 태양열집열 시스템 개발 .....	27
제 2 절 실증 실험용 PTC형 태양열 집열시스템 개발 .....	54
제 3 절 태양열 건조시스템 개발 .....	92
제 4 절 태양열 건조장치의 성능 및 경제성 분석 .....	114
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	120
제 1 절 연구개발목표의 달성도 .....	120
제 2 절 관련분야에의 기여도 .....	121
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	122
제 1 절 실용화 및 산업화 계획 .....	122
제 2 절 기술자료 및 정책자료 제공 .....	123
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보 .....	124
제 1 절 태양열 집광기술 .....	124
제 2 절 태양추적 기술 .....	126
제 3 절 축열기술 .....	127
제 7 장 참고문헌 .....	130



# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발의 목적

본 연구개발의 최종목표는 고효율의 PTC형 태양열집열기, 태양추적장치, 축열조, 보조열원부, 열교환기 및 제어부의 알고리즘을 개발하고, 이를 이용한 에너지 절약형 고효율의 태양열 농산물 건조장치를 설계·제작하며, 실증시험을 통해 개발된 건조장치의 성능분석 및 다양한 농산물의 건조특성 분석과 개발된 태양열 건조장치의 성능검증 및 태양열 건조장치에 대한 경제성 분석을 수행하는데 있다.

### 2. 연구개발의 필요성

현재 우리나라는 에너지 소비 세계 10위이고, 석유소비는 세계 7위, 에너지 소비 증가율은 OECD가입국 중 1위이다. 우리나라는 석유가 생산되지 않아 전체사용량의 97.2%를 수입에 의존하고 있고, 2005년 기준으로 총 수입액의 26%에 달하는 667억 달러를 에너지 수입에 사용했다. 연간 수조원이 대기로, 도로위로 사라지고 있다. 자원의존도가 큰 석유가 감소했을 경우 경제에 미치는 영향은 엄청나며 에너지원의 감소는 인류발전의 엄청난 퇴보를 가져올 것이 분명하다. 원자력에너지가 국내 총 전력생산량의 약 38%를 차지하고 있어 발전효율성 측면을 고려한다면 매우 효율적인 에너지원이어서 든든한 면이 있다. 하지만 쓸데없이 낭비되는 에너지가 증가된다면 원자력도 한계성을 드러낼 수밖에 없다. 또한 우리나라는 방사성폐기물처분장 부지 선정을 두고 지난 19년간 부안 사태 등 심각한 사회적 갈등을 겪은 바 있다. 전 세계 석유 매장량은 1조2천128억 배럴로 추정되며, 석유채취기술의 증가로 약간의 변동은 있겠지만 석유 소비량이 약 289억 배럴(2001년 기준)이므로 약 41년 정도 사용 가능한 양이다.

우리나라의 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가추세로 '98년 통계에 의하면 국내 소비 에너지 사용량의 97%이상이 수입에 의존하고 있는 실정이며, 지구 환경문제와 관련하여 지구 온난화의 원인 중 화석연료(화석에너지의 단위 열량당 CO<sub>2</sub> 발생량은 석탄 0.098 g/kcal, 석유 0.079g/kcal, 천연가스 0.056 g/kcal)에 따른 영향이 55% 이상을 차지하고 있다. 특히 이 중에서 화석연료에서 발생하는 이산화탄소에 의한 지구온난화현상(지구 온난화에 대한 온실가스의 기여도 CO<sub>2</sub> 55%, CFC-11 17%, CFC-12 7%, CH<sub>4</sub> 15%, N<sub>2</sub>O 6%)이 가장 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제들의 해결의 일환으로 각 국에서는 에너지 절약 기

술과 아울러 대체에너지의 개발에 중단 없는 노력을 경주하고 있다. 전 세계적으로 에너지와 환경에 대한 위기의식이 고조되고 있으며, 이와 근본적인 해결을 위해 에너지 절약은 물론 새로운 대체 에너지 개발을 위해 부단한 노력과 막대한 투자를 해오고 있다. 특히 우리나라의 경우 에너지의 해외 의존도가 높아 국제 에너지 가격의 변동에 따라 국민경제 및 생활이 민감한 반응을 나타 낼 수 있다. 무한 청정 에너지원으로서 태양열은 화석연료의 사용에 따른 환경오염과 같은 문제점뿐만 아니라 국내 에너지공급의 한계성을 고려하여 볼 때 차세대 대체에너지로서의 개발 필요성을 갖는 중요한 에너지 자원이다. 공업발전으로 인한 환경오염, 에너지 고갈로 인해, 요즘 전 세계적으로 천연자원을 이용하여 대체에너지를 활용하는 방법에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 우리나라는 이를 해결하기 위해 끊임없는 노력과 엄청난 투자를 한 실정에도 불구하고, 에너지의 해외 의존도가 높아져 에너지 가격 변동에 따라 민감한 반응을 보여야만 했다. 이제 우리는 에너지에 대한 해외 의존도를 줄이고, 우리의 힘으로 발전해 나갈 수 있는 힘을 키워야 할 때이다. 화석에너지를 많이 사용하고 있는 지금 환경파괴는 물론 지구온난화 등을 방지하기 위하여 대체 에너지원으로 에너지의 고갈이 없고, 청정하게 발전시킬 수 있는 대체 에너지원은 태양 에너지다.

단순히 화석연료의 대체가 아니라 무공해이면서 환경오염을 발생시키지 않는 청정에너지를 대체에너지로 정의한다. 따라서 대체에너지는 환경오염을 거의 일으키지 않고, 고갈되지 않는 순환 자원의 성격을 가지고 있는 것이다. 대체에너지 이외에도 지구상에 있는 모든 에너지는 그 근원이 태양에 있다고 할 수 있다. 하지만 대체에너지는 막대한 초기투자 소요와 낮은 가격 경쟁력 등의 경제성 문제에도 불구하고, 화석 에너지의 고갈 문제와 환경문제에 대한 핵심 해결 방안이라는 점에서, 태양은 50억년 전부터 우리에게 무한정한 청정에너지를 제공하고 있고, 앞으로 50억년 후에도 소멸된다고 하니 그 중요성과 개발 필요성은 날로 증가하고 있다. 현대의 주된 에너지원인 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료 매장량에 대한 한계성, 이의 부산물로 발생하는 공해 등을 생각하여 볼 때 가까운 장래에 닥칠 심각한 에너지난과 환경상의 제약으로 인한 파국을 벗어나기 위하여 무공해이며 무궁무진한 태양에너지에 대한 연구개발이 촉진되고 있고, 기술적인 면에서 이용 가능성이 입증되었으며, 부분적으로 태양에너지 이용 기기의 생산이 이루어지고는 있으나, 아직 이 연구들이 큰 성과를 거두지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 우리는 이를 고효율화 시키기 위한 지속적인 연구와 개발을 통해 대체에너지로 각광받고 있는 태양열 에너지를 잘 활용하여 이를 더욱더 발전시켜야 할 것이다.

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 하여 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하였다. 그러나 에너지원이 한정되어 있는 우리나라의 현실로 볼 때 에너지원의 확보를 위한 대책이 명확하게 수립되어 있지 못한 실정에서 에너지원의 대부분을 수입에 의

존하고 있는 실정이다. 더욱이 자본구조가 취약한 농업부문에서는 에너지 가격의 상승이 농업생산비를 증가시키고 있어 농업시설물의 유지 및 운영에 위기를 맞이하고 있다. 우리나라의 에너지 자원 확보는 지속적으로 대두될 문제라는데 심각성이 크며, 이 때문에 관계 정부당국에서는 면세유 확대공급, 대체 에너지원 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.

우리나라는 지리적인 위치와 계절적 기후조건이 연중 태양에너지를 충분히 공급받을 수 있으며 특히 동절기에는 날씨가 건조하고 맑아 태양 복사량이 많은 편이어서 태양열 이용에 매우 유리하다. 그러므로 대체에너지로서 태양열 이용분야의 실용기술을 개발하여 농업에너지원으로서의 확대 및 보급이 절실한 실정이다.

따라서 국내에서 개발이 시도된 적이 없는 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치의 개발 필요성을 기술적인 측면, 경제·산업적인 측면, 사회·문화적 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 기술적 측면

태양은 100년 전이나 지금이나 마찬가지로 우리에게 무한정한 청정에너지를 제공하고 있으며, 단지 태양에너지 밀도가 산업사회의 발달로 인하여 대기의 환경오염이 가중되어 지표면까지 도달하는 동안 산란과 흡수가 많이 일어나는 것을 빼고는 별로 변한 것이 없다. 태양은 봄, 여름, 가을, 겨울의 주어진 고도와 방위각에 따라 태양의 궤도를 따라 일정하게 움직이고 있으며, 이러한 태양에너지를 이용하여 농산물을 건조하는데 사용료가 전혀 요구되지 않는다. 국내에서는 이미 많은 저온 분야에서 태양에너지의 이용기술에 관한 연구들이 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 이와 같은 노력에도 불구하고 국내에서의 태양에너지 활용시스템의 실용화는 가정용 태양열 온수기를 제외한 모든 분야에서 지극히 미미한 발전을 거듭하여 아직 비교적 초보단계에 머무르고 있는 실정이다. 태양열의 이용을 위해 단지 응용분야와 규모에 따라 단위 면적당 이용효율을 높이기 위해서 고효율의 기기를 제작하는데 드는 비용이 전부이며, 예로 고효율의 태양열집열기 또는 집광기, 태양연못 (Solar Pond) 등이 태양에너지를 효과적으로 직접 이용하는데 필요한 기기들이다. 현재 국외의 여러 나라에서 이러한 중·고온용 태양열 집열기의 개발을 오래 전부터 추진해 오고 있으며, 특히 집열기의 고 효율화에 노력을 경주하고 있는 실정이다. 건조장치에 이러한 태양열시스템을 적용하기 위해서는 무엇보다도 제작 및 시공원가가 감소되어야 할 뿐만 아니라 운용상의 경제성을 갖추어야 함으로, 이를 위하여 저가 원자재 선정 및 열매체에 의한 저비용의 중고온용 태양열집열기를 개발하여 건조장치에 이용하는 것이 무엇보다 필요할 것이다.

#### 나. 경제·산업적 측면

우리나라가 수입에 의존하고 있는 두바이유 가격이 최근 1배럴에 100달러를 넘어섰고, 석유 부존자원이 없는 우리나라로서는 PTC형 태양열집열기와 같이 태양에너지를 효율적으로 이용하는 설비개발이 매우 시급한 실정이다. 농가에 공급되는 면세경유의 가격이 2003년에 417원/ℓ에서 2006년에는 619원/ℓ으로 상승하였고, 2008년에는 1,200원/ℓ으로 상승하여 저비용의 농업 대체에너지 이용기술 개발이 시급한 실정이다. 농업 면세유 공급량은 1995년 기준으로 147만 kℓ에서 2006년에는 248만 kℓ로 101 kℓ가 증가하였고, 2006년 면세유류 농민구입액 및 감면세액은 각각 1조 6천억원 및 1조 3천억원으로 총 면세류 비용은 2조 9천억원의 막대한 에너지 비용이 소요되고 있어 태양열 이용기술과 같은 저비용의 대체에너지 이용 기술개발이 시급한 실정이다. 우리나라의 농업용 건조기 보유 대수는 2006년 기준으로 곡물건조기(순환식)가 73,205대, 농산물건조기(평면식)가 188,668대였으며, 2002년도 농업용 곡물건조기 보유대수는 60,672대, 농산물건조기는 169,708대로 2002년도에 비해 2006년도에 곡물건조기는 12,533대, 농산물건조기는 18,960대가 증가하여 유류 값상승에 따른 농가의 건조비용 부담이 급격히 상승하고 있어, 농가 실정에 맞는 저비용의 태양열 이용 기술개발 보급이 시급한 실정이다(표 1-1).

<표 1-1> 농가용 건조기 보유대수

연도	2002	2003	2004	2005	2006
건조기 종류					
곡물건조기(순환식)	60,672	63,633	66,437	70,363	73,205
농산물건조기(평면식)	169,708	171,519	176,606	184,097	188,668
합계	230,380	235,152	243,043	254,460	261,873

자료: 농업기계연감(2007)

국내의 가장 많이 보급되어온 일반 농수축산물 건조기는 바닥면적 기준으로 0.5~2평이며, 등유를 사용원료로 하여 외부공기를 실내로 유입, 보일러를 사용하여 고온으로 가열하는 열풍건조 방식을 채택하고 있으나, 유류비용이 매우 많이 소요되고 있다. 기존의 열풍건조기는 고유가 시대에 에너지 비용이 급증할 뿐 아니라, 배열 및 연소배기가스의 배출로 ODP(지구온난화 계수) 증가 요인이 되고 있다. 따라서 고유가에 대비하여, 농산물건조에 유효하게 이용할 수 있는 태양열 건조장치의 개발이 매우 필요한 시기이다. 대체에너지원 중에서 비교적 적은 연구개발 비용과 짧은 연구개발 기간에 실용화가 가능한 분야 중의 하나가 바로 태양열 에너지 이용 분야이다. 그 동안 태양열 이용보급분야의 실용화는 평판형 태양열집열기를 채용한 가정용 태양열 온수기를 중심으로 상당히 보급이 활발하게 진행되어 왔으나, 평판형 태양열집열기는 비교적 낮은 온도(70℃ 이하)에서 온수급탕 열원으로 이용되는 집열기이며, 70℃ 이상의 열원을 요구하는 시설의 에너지원으로는 효율적이

지 못하다. 평판형 태양열집열기의 이용이 매우 한정되어 있는 국내시장을 본 과제를 통하여 저비용의 PTC 태양열 집열기를 개발하여 건조장치에 이용함으로써 농가의 에너지 비용을 줄이고, 대규모 수요 창출에 의한 유류의 수입대체효과를 극대화시킬 수 있을 것이다. 특히, 국내의 농업분야에서 필수적으로 열에너지를 요구하는 분야인 건조과정에 태양열을 값싸고 효율적으로 이용 할 수 있는 장치 개발은 대체에너지 이용 차원에서 매우 중요하다. 기후변화협약 이후 예상되는 청정 에너지기술에 대한 선진국의 기술독점에 대비하여 자체 개발을 통해 낙후된 국내의 태양열 에너지 산업의 선진화가 필요한 실정이다.

#### 다. 사회·문화적 측면

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 정부의 적극적인 지원에 부응하여 새로운 대체에너지 시스템의 실용화를 전제로 연구 집단의 적극적 기술개발이 필요한 실정이다. 국내 수요에너지의 98%를 수입에 의존함에 따라 수입대체 효과가 크다고 할 수 있는 대체 에너지의 실용화를 통하여 현 국내 상황에서 강력히 요구되는 농업의 국가 경쟁력제고의 한 방법으로 고효율의 태양열 농산물 건조장치 기술개발은 절대적으로 필요한 연구이다. 유가상승과 국제적 환경규제가 본격화되면 국제적인 기술보호 장벽을 고려할 때 21세기 전반에 예상되는 급격한 에너지 환경변화에 자체 기술력을 갖고 대응할 수 있느냐 하는 것은 국가적으로 매우 중요한 변수가 될 것임으로 이를 위해 앞으로 우리가 해야 할 일은 전 국민적으로 대체에너지에 대한 인식을 높이고 적극적인 기술개발 및 보급정책에 호응하도록 하는 사회분위기를 진작하는 일일 것이다. 이를 대체에너지 이용 기술개발 측면에서 지원하기 위해서는 보급에 효과적인 종합 이용 시스템을 적극 개발하여야 할 것이고, 특히 손이 닿지 않는 곳에 있는 농촌에도 상당한 심혈을 기울이지 않으면 안 될 것이며, 농업은 우리가 앞으로도 관심을 갖지 않으면 안 될 부분 중의 하나로 누구도 농업의 힘없이 생존할 수 없다는 것을 잊어서는 안 될 것이다. 앞으로 예상되는 에너지 시스템 환경변화를 객관적으로 인지하고 태양열과 같은 대체에너지가 차세대의 에너지공급을 담당 할 수 있어야만 에너지 문제로 재정적 곤경을 겪고 있는 농촌을 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 것이다.

### 3. 연구개발의 범위

#### 가. 소형 PTC 태양열집열 시스템 개발

- 1) 실험용 PTC 태양열집기 설계 및 제작
- 2) 흡수관이 PTC 태양열 시스템 성능에 미치는 영향분석
- 3) 실험용 PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델
- 4) PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델 검증 및 성능분석

#### 나. 실증 실험용 PTC형 태양열 집열 시스템 개발

- 1) PTC형 태양열집열기 설계 및 제작
- 2) 흡수관
- 3) 태양추적 제어장치 설계 및 제작
- 4) 태양추적 PTC형 태양열집열기
- 5) 축열조 설계·제작
- 6) 열매체 보충탱크 설계·제작
- 7) 차온 제어장치 설비
- 8) PTC 태양열 집열시스템 작동방법 및 자료획득 장치구성
- 9) PTC형 태양열 집열 시스템 성능분석
- 10) PTC형 태양열 집열 시스템 열전달 모델 시뮬레이션

#### 다. 태양열 건조시스템 개발

- 1) 태양열 건조장치 설계 및 제작
- 2) 열교환기
- 3) 제어기의 구성
- 4) 제어기 동작
- 5) PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치 구성
- 6) 건조기 내 온습도 및 풍속 분석
- 7) PTC 태양열 건조장치에 의한 농산물 건조 특성 분석

#### 라. 태양열 건조장치의 건조성능 및 경제성분석

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 기술개발 현황

우리나라의 평균일사량(수평면 전일사량)은  $1 \text{ m}^2$  당 하루 3천1백 칼로리로서 우리나라의 태양열 이용기술개발의 성공 잠재적 여건을 제시하고 있다. 한편, 일사량 성분 중 직달일사량은 최근에 고온에너지를 얻도록 설계되는 고온 집열시스템, 즉 PTC 태양열집열기와 같은 기기의 개발과 보급을 위해서 절대적으로 요구되며, 우리나라는 청명한 날  $1 \text{ m}^2$  당 하루 4천440 칼로리의 직달 일사에너지에 받고 있는 것으로 나타났고, 이로써 우리나라에서도 고효율 태양열 집열시스템의 활용이 가능하다는 점이 입증되었으며, 따라서 일사량의 50%를 열로 변환시킬 수 있는 고 집열 기술의 활성화가 기대된다.

우리나라의 태양열 에너지 기술개발 및 보급현황을 살펴보면 1994년도 이전까지의 태양열 이용분야는 저온 분야로 가정에 온수를 공급할 목적으로 자연형 온수급탕 분야에 집중되어 개발되어 왔다. 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 있었다. 그러나 이러한 온수기들은  $70^\circ\text{C}$  이상으로 온도가 올라갈수록 주위 온도와의 열손실이 크기 때문에 집열효율이 저하되어 사용하는데 제한요소가 되었다. 우리나라는 평판형 집열기를 사용한 가정용 온수 시스템이 대부분을 차지하고 있고, 현 국내 대용량 설비로서 비닐하우스 난방, 지중난방 또는 양어장에 응용하여 설치한 사례가 있으나 모두 실패한 것으로 시장조사 결과 밝혀진 실정이다. 태양열 온수기는 저온용으로서 난방을 위한 열원으로 사용할 때 기술적, 경제적으로 문제점을 가지고 있음이 드러났으며, 또한 상변화식 진공관형 태양열집열기를 사용한 시스템의 경우 외국에서 전량 수입하여 시공하는 대리점 수준의 업체가 있으나 상당히 고가인 것이 단점이다.

정부에서는 1994년부터 대체에너지원으로서 태양열 이용효율을 높이기 위해서 중·고온 분야에 연구개발을 집중하기 시작했다. 현재 국내의 태양열 이용은 그간의 평판형 태양열집열기를 이용한 태양열 온수기의 개발 및 보급 실적을 바탕으로 중온형 및 고온형 태양열 집열 시스템의 개발 및 실용화를 추진하는 단계에까지 진입했다고 할 수 있다. 태양열의 적용도 국민 생활의 향상과 함께 난방 및 온수 급탕 등의 단순한 것으로부터 냉방 그리고 산업 공정 등으로 그 범위가 점차 확대되고 기술도 선진국의 그것을 접목시키는 과정으로 발전되고 있다고 할 수 있다. 그러나 현재 정부지원 하에 실용화된 고효율 태양열 집광시스템은 전무한 상태로 선진국의 개발동향과 국내의 일사조건에 비추어 보았을 때 한국형의 고효율 태양열 집열기를 개발하여 이를 농산물 건조기와 같은 농산업공정에 이용하는 것이 매우 효율적일 것이다.

## 제 2 절 국외 기술개발 현황

기후변화 협약 후 선진국들의 경우 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위해 대체에너지 연구개발에 대한 정부의 지원을 증가시키는 추세에 있으며 이에 따라 여러 대체 에너지자원 중에서 높은 점유율을 차지하는 태양열 이용이 현격히 증가할 것으로 예상된다. 태양열 이용기술 개발은 저온분야의 경우 첨단소재 개발을 통한 고효율, 저가화에 집중하고 있으며, 최근에는 중고온분야의 태양열발전, 태양열 화학시스템의 응용 개발에 많은 연구 투자가 이루어지고 있다. 선진국에서는 국가별 특성에 맞는 태양열 이용기술을 중점 개발하여 보급하고 있으며(미국: 태양열발전, 일본·호주: 온수기, 유럽: 대규모 집단난방 및 급탕시스템 등), 저온 태양열 시스템 보급 활성화를 위한 인증시험 및 평가, 신뢰성 향상 등에 지속적인 연구를 추진하고 있다.

미국의 경우 80년대 정부의 세금지원과 고유가로 활성화되었던 태양열 산업이 89년 이후 급격히 쇠퇴하여 지금까지 침체되었으나 시장여건 변화로 1991년에 들어서 연간 4% 성장률을 보였고, 현재는 정부의 적극적인 지원으로 재도약하는 추세에 있다. 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 지원 하에 여러 각도로 이루어지고 있다. 특히 미국의 경우 태양열시스템 개발은 대부분 중고온용 태양열집열기에 주력하고 있다. 영국의 경우 대체에너지원 중의 하나인 태양열 이용효율 극대화를 위한 진공관형 태양열집열기의 개발 및 실용화 현황을 살펴보면 Thermomax사에서는 수년 동안 다공성 벽이 없는 히트파이프를 사용한 진공관형 태양열집열기를 개발하였고, 각국에 엄선된 대리점을 통해 판매하고 있다. 일본에서는 NEG사가 집열 저장형<SP4-2400>과 흰 튜브형<DP6-2800>의 집열기 개발 및 판매를 통해 급탕뿐만 아니라 흡수식 냉방시스템과 연결하여 냉·난방에 적용하고 있다.

호주에서는 Fresnel Reflector가 부착된 ET(Evacuated Tube)형 태양열집열기를 이용하여, 대규모(300MW) 태양열 발전 project를 수행 중에 있다. 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 판매 중이다.

유럽의 기술개발 및 보급의 핵심은 태양열 난방 및 온수기, 자연형 태양열 등이고, 수출을 목적으로 한 태양열발전 등의 개발이 지속적으로 추진 중이다(JOULE 프로그램 내, THERMIE 프로그램). 유럽의 경우 '98년 현재 그리스 태양열집열기

총 설치규모는 약200만 $m^2$ 인데, 독일, 오스트리아, 그리스가 유럽전체 판매량의 80%를 점유하고 있다. 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 엔진 개발을 완료한 상태이다. 이와 같이 세계가 대체에너지 개발을 통하여 자국의 신재생 에너지 기술력을 홍보하는 한편 개발된 기술을 바탕으로 제품의 저가 등으로 적극 수출을 도모하는데 많은 노력을 경주하고 있는 실정이다.

### 제 3 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

기존의 액체식 평판형 태양열집열기에 의한 토출온도(최대 70℃)를 PTC형 태양열집열기로 대체하여 토출온도를 90℃이상으로 증가시켜 이용함으로써 집열기 최적 설계시 확장성을 극대화함으로써 상대적으로 고온 및 대용량을 요하는 건조장치와 같은 농산업용 태양열시스템의 Space/Process Heating에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 과제의 성공적인 개발을 통하여 선진국 수준이상의 가격경쟁력을 갖춘 새로운 모델 개발이 용이할 것이며, 신기술의 도입에 의해 기존 태양열시스템의 문제점을 극복하고 세대교체를 이룰 수 있을 뿐만 아니라 대용량의 산업용 태양열시스템으로의 전환점을 마련할 수 있을 것이다. 또한 본 연구 결과는 태양열을 효율적으로 집열 할 수 있는 장치개발의 모델이 될 것이며, 태양열 집열기술에 대한 과학적 기초지식을 증진시키는데 큰 도움이 될 것이다.

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 고효율의 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치 기술개발과 같은 연구는 국외의 큰 관심분야가 될 것이다. 본 연구에서 태양열 집열효율이 매우 우수한 PTC형 태양열집열기를 개발하여 태양열을 효율적으로 집열하여 건조장치에 이용함으로써 기존의 유류사용 열풍건조기에 비해 태양에너지를 건조기에 이용함으로써 인해 유류비용을 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 건조장치로 그 활용성이 크게 기대된다. 또한 본 연구에서 개발된 태양열건조장치의 구성요소는 태양열의 최대한 집열을 위해 태양추적장치를 부착한 고효율의 PTC형 태양열집열기, 축열조, 보조열원부, 열교환기 및 제어부이며, 태양복사열을 축열조의 열매체에 저장하고, 열교환기를 통해 건조공기를 건조실로 유입하며, 제어부를 통해 건조온도를 적절히 조절할 수 있는 에너지 절약형 고효율의 태양열 농산물 건조장치로 기술적인 측면에서 신기술인증 획득이 가능하여 저비용의 농가 보급이 크게 기대된다.

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 소형 PTC 태양열집열 시스템 개발

#### 1. 실험용 PTC 태양열집열기 설계 및 제작

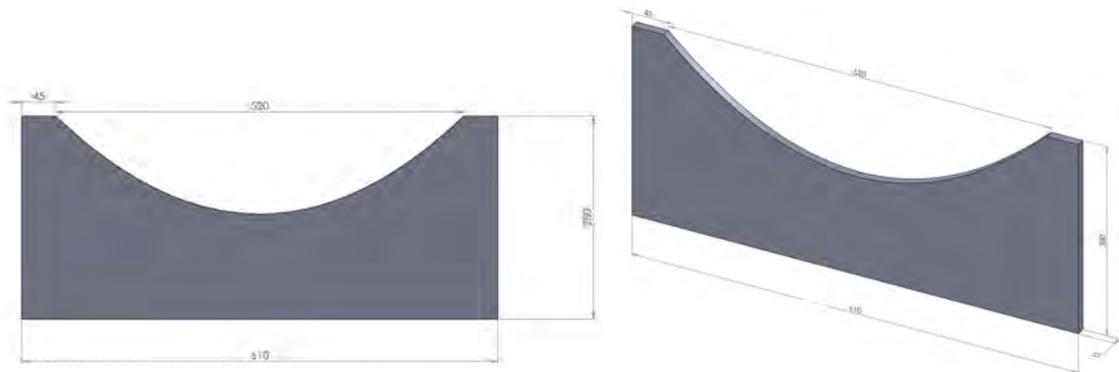
PTC 태양열집열기의 가장 중요한 부분인 반사판은 태양광을 집광부로 반사시켜 태양열을 선으로 집열하는 부분으로 PTC 반사판의 설계를 위해 다음의 식을 사용하여 곡면을 설계 및 제작하였다.

$$y = \frac{x^2}{4f} \text{ ----- (1-1)}$$

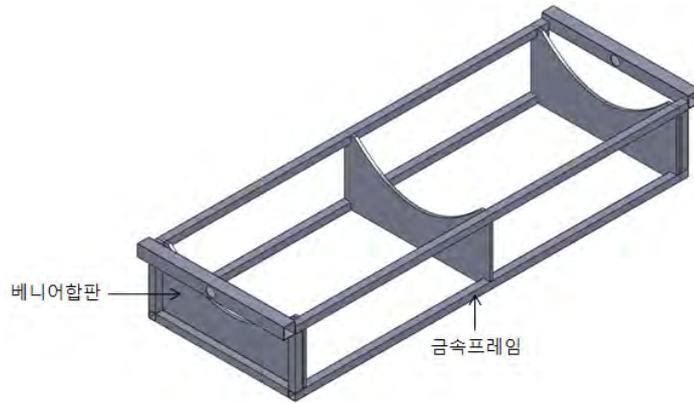
식(1-1)에서  $f$ 는 초점을 나타내며 태양광이 초점에 모이게 된다. 초점  $f$ 값을 일단 정하고 식(1-1)을 이용한 곡선의 식을 따라 PTC 반사판을 후면에서 지지할 수 있도록 지지대로 이용하기 위해 양면이 코팅된 베니어합판(두께: 12 mm)을 CNC로 그림 1-1과 같이 정밀 가공하였다. 반사판의 호의 길이(S)는 다음의 식 (1-2)를 이용하여 구하였다.

$$S = 2f \left[ \sec \frac{\phi_r}{2} \tan \frac{\phi_r}{2} + \ln \left( \sec \frac{\phi_r}{2} \tan \frac{\phi_r}{2} \right) \right] \text{ ----- (1-2)}$$

식 (1-2)에서  $\phi_r$ 은 립각으로 본 연구에서는  $90^\circ$ 로 정하였다. 식 (1-1)을 이용하여 구한 PTC 반사판 호의 길이는 596.8 mm이며, 받침판의 크기는 가로 610 mm, 높이 280 mm로 제작하였다. 가공된 3개의 베니어합판은 30 mm × 30 mm 사각 파이프로 제작된 금속프레임 내에 좌우에 2개 및 중간에 1개를 끼워 넣고 고정하여 PTC반사판을 지지하게 하였다(그림 1-2).

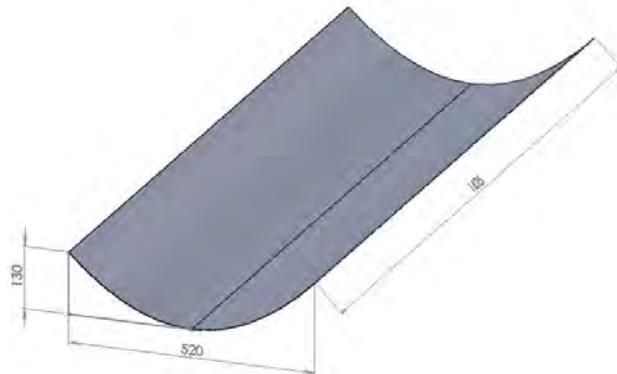


<그림 1-1> PTC 반사판을 지지하기 CNC 가공된 베니어합판.



<그림 1-2> PTC 반사판 지지용 금속 프레임.

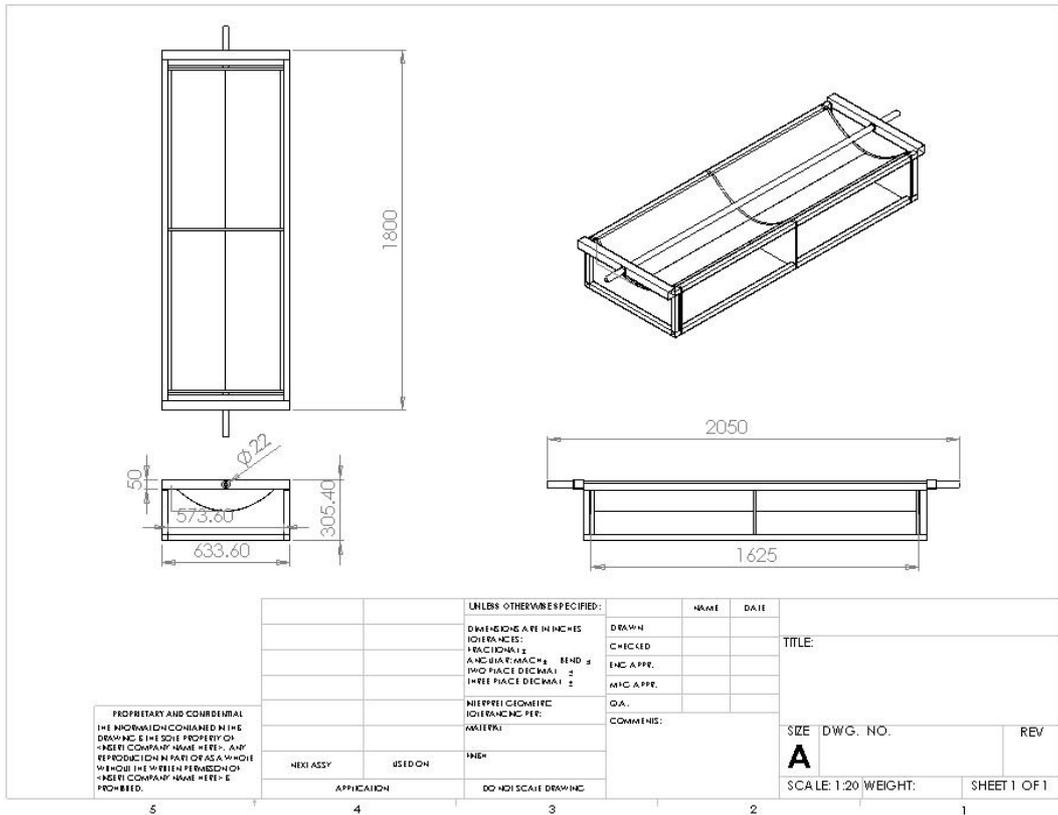
계산된 호의 길이에 맞게 88%의 반사율을 갖는 알루미늄 반사판(Solar Surface 992, Alcan Co., Canada)을 그림 1-3과 같이 절단하여 사용하였다. 일정 크기로 절단된 PTC 반사판은 베니어합판을 이용해 PTC 반사판을 지지하기 위해 제작된 금속 프레임위에 글루건을 이용하여 부착하였으며, PTC 반사판은 2종류로 교체 사용할 수 있게 제작하였다. 제작된 PTC 태양열집열기의 크기는 표 1-1과 같다. 가공된 베니어합판 및 사각파이프로를 이용한 지지대 위에 PTC 반사판을 설치하고, 수광부인 파이프를 초점인 중심선에 설치하여 그림 1-4와 같이 소형 PTC 태양열집열기를 제작하였다. 소형 PTC 태양열집열기 제작을 위한 도면은 그림 1-5와 같다.



<그림 1-3> PTC 알루미늄 반사판.

<표 1-1> PTC 태양열집열기의 크기

Description	Dimension
Focal distance ( $f$ )	130 mm
Rim angle ( $\phi_r$ )	90°
Parabola length	1600 mm
Parabola aperture	520 mm
Aperture area	0.832 m <sup>2</sup>
Concentration ratio	7.63



<그림 1-5> 소형 PTC 태양열집열기 설계도면.

PTC 태양열집열기는 그림 1-6과 같이 금속 사각파이프 및 앵글을 이용하여 제작한 철제 프레임위에 설치하였다. PTC 태양열집열기는 상부 프레임에 놓이게 되며, 경사각을 조절할 수 있도록 상부프레임과 하부프레임에 금속 파이프로 된 지지대를 연결하여 지지대의 길이를 조절함으로써 PTC 태양열집열기의 설치각도를 조절 가능하도록 하였다. 본 실험에서 PTC 태양열집열기를 35도 각도로 설치하였다.



<그림 1-6> PTC 태양열집열기 설치하기 위해 제작된 프레임.

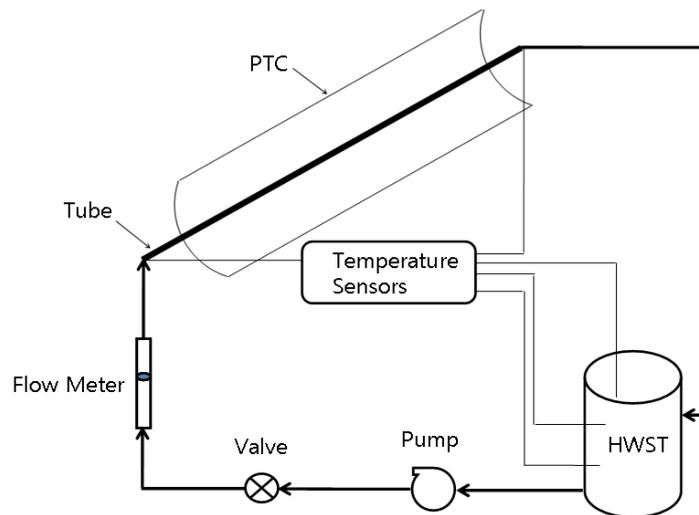
## 2. 흡수관이 PTC 태양열 시스템 성능에 미치는 영향분석

### 가. 연구목적

본 연구에서는 PTC 흡수관의 재료(아연도금강, 스테인레스 및 동), 흡수관의 흑색 코팅 유무, 유체순환 유량 및 PTC 흡수관 외부에 폴리카보네이트 튜브(PC Tube)설비 유무가 PTC 태양열시스템의 성능에 미치는 영향 및 축열조의 축열성능을 분석 위한 것이다.

### 나. 성능실험 장치 구성

제작된 PTC 태양열집열기를 이용해 온수를 생산할 수 있는 시스템을 그림 1-7과 같이 구성하였다. PTC 태양열 집열 시스템은 PTC, 140ℓ 용량의 축열조(HWST), 유체순환 펌프, 유량계로 구성되어 있다. 여기서 축열조의 물(140ℓ)은 펌프를 지나 밸브를 통하여 유량계를 순환한 뒤 흡수관을 통과하여 다시 축열조로 들어오는 순환형으로 되어 있으며, 유체순환 유량은 18ℓ/min을 기준으로 하여 실험을 수행하였다.



<그림 1-7> PTC 태양열집열기를 이용한 태양열집열 시스템 구성도.

각 2개의 PTC 태양열 집열 시스템의 축열조 내 상, 중, 하에 한 개씩의 온도센서(T type)를 부착 하고, 각 흡수관의 입구와 출구에 하나씩, 그리고 외기온도 측정을 위해 지상 1 m 지점의 그늘진 곳에 온도센서 1개를 설치하였다. 각 온도센서는 자료수집장치(GL800, GEAPHTEC, USA)에 연결하여 10분 간격으로 온도측정 자료를 수집하였다. 여기서 축열조 내 3곳의 물의 평균온도를 계산하여 실험조건에 따른 축열조 내 물의 온도변화를 조사하였다. 또한 일사량 측정을 위해 일사량 센서

(EQ08, Middleton solar, Australia)를 그늘이 없는 곳에 설치한 후 자료수집장치 (KL200, MRM System, Korea)에 연결하여 일사량 데이터를 수집 하였다. 실제 PTC시스템 사진은 그림 1-8과 같다.



<그림 1-8> PTC 태양열집열기를 이용한 태양열집열시스템.

#### 다. 실험방법

본 연구에서 PTC형 태양열집열 시스템 성능에 영향을 미치는 실험요소로 태양열을 집열 할 수 있는 PTC형 태양열 집열기의 흡수관 재료(아연도금강관, 스테인리스관, 동관), 유체순환 유량, PTC 흡수관 외부에 폴리카보네이트 튜브(PC tube)설비 유무 및 흡수관의 흑색 코팅유무가 고려되었다. 따라서 본 연구에서는 동일한 두개의 PTC형 태양열집열기를 남향으로 35°가 되게 제작 및 설치하여 동일한 태양조건하에 PTC형 태양열집열기의 성능에 영향을 미치는 하나의 실험요소를 변경하면서 PTC 태양열 집열시스템 성능 실험을 수행하였다. 각 실험조건에서 축열조 내 물의 온도 차이를 비교 및 분석하여 PTC 태양열 집열시스템 성능의 우수성을 분석하였다. 본 실험은 2009년 10월 및 11월에 각 실험요소별로 오전 7시부터 오후 5시 30분까지 수행 되었다. 또한 축열조의 축열성능 분석을 위해 오전 11시부터 오후 2시까지 10분 간격으로 일정한 순환유량(180 ℓ/min)하에서 단위시간(10분) 마다 축열조에 축적되는 축열량을 분석하였다.

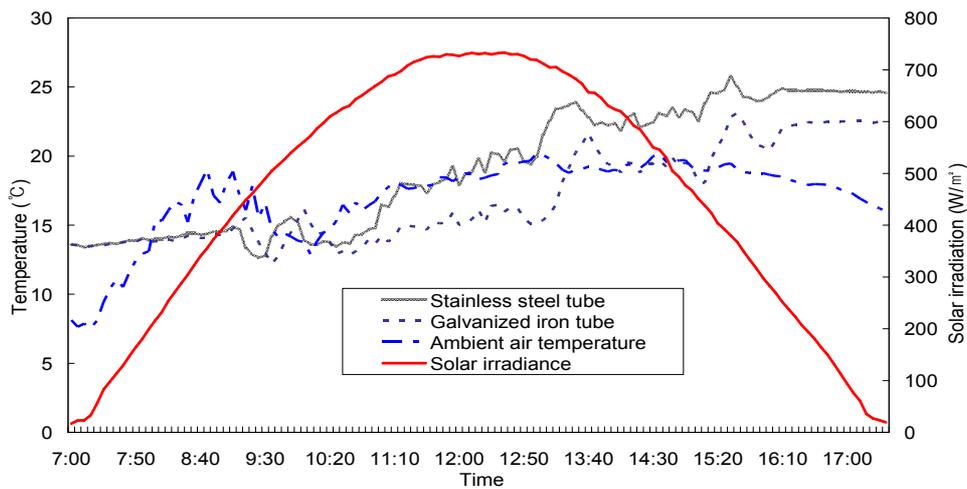
#### 라. 결과 및 고찰

흡수관 재료가 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 크기(외경:21.7 mm, 내경17.4 mm, 두께:2.1 mm)를 갖는 스테인리스관과 아연도금강관 및 동관을 사용하여 실험을 수행 하였다. 각 3개의 흡수관 소재

중 가장 성능이 우수한 것을 선정 하여 동일한 PTC 태양열 집열기에 설치한 후 흡수관에 흐르는 물의 유량을 18 l/min, 13.5 l/min, 9 l/min 3가지를 서로 다르게 하여 유량이 PTC 태양열집열기의 성능에 미치는 영향을 분석 하였다. 또한 흡수관에 PC관(Polycarbonate Tube)(외경:32mm 내경:29mm 두께:1.5mm) 설비 유무 및 흡수관의 흑색코팅 유무가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

(1) 흡수관인 스테인리스관과 아연도금강관이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향 분석

그림 1-9에 나타낸 것과 같이 실험 전반기(약 3시간 까지)에는 스테인리스관과 아연도금강관 흡수관이 축열조 내 물의 온도상승에 미치는 효과는 거의 같았다. 그러나 태양 복사열이 PTC 태양열집열기의 흡수관에 잘 집광되기 시작하는 실험시작 약 3시간 이후부터는 스테인리스관을 흡수관으로 사용하였을 때 축열조 내 물의 상승효과는 아연도금강관을 흡수관으로 사용하였을 때 보다 매우 큰 것으로 나타났다. 최대 축열조 내 물의 온도차는 스테인리스 흡수관을 사용한 시스템이 아연도금강관을 흡수관으로 사용하였을 때 보다 6.8°C가 높게 나타났다. 따라서 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 것이 아연도금강관을 흡수관으로 사용하는 것 보다 PTC 태양열 집열 시스템의 효율에 미치는 영향이 매우 좋은 것으로 판단된다.

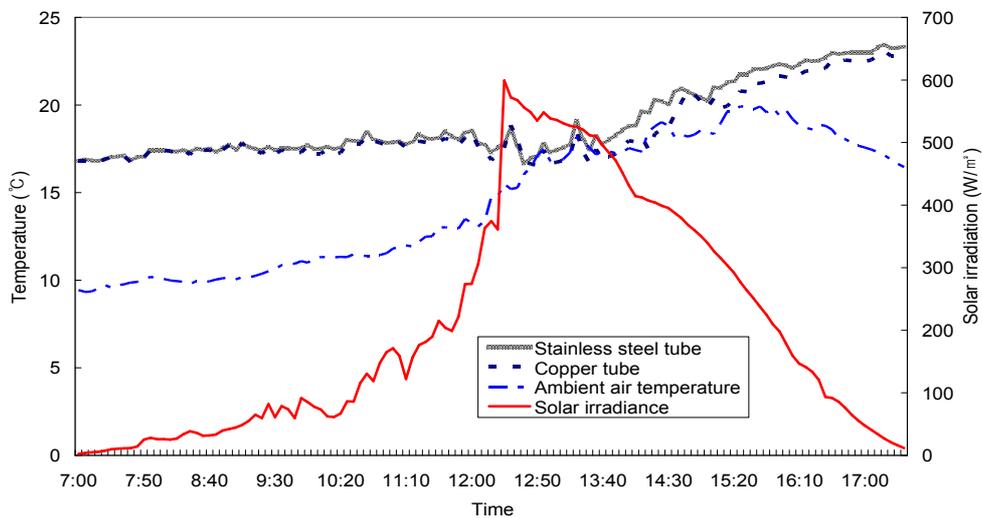


<그림 1-9> 흡수관인 스테인리스관과 아연도금강관이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(2) 흡수관인 스테인리스관과 동관이 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 미치는 영향 분석

흡수관인 스테인리스관과 동관이 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 실험 결과를 그림 1-10에 나타내었다. 오전에는 흐린 날씨로 인해 태양 복

사열이 PTC 태양열 흡수관에 잘 집광되지 않아 흡수관인 스테인리스관과 동관이 PTC 태양열 집열 시스템에 미치는 영향은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 오후부터는 맑은 날씨를 보였으며, 흡수관으로 스테인리스관을 사용하는 것이 동관을 사용하는 것 보다 PTC 태양열 집열 시스템의 축열조 내 물의 온도상승 효과가 큰 것으로 나타났다. 축열조 내 물의 최대 온도 차는 스테인리스관을 흡수관으로 사용하였을 때 동관을 흡수관으로 사용하였을 때 보다 2.1°C가 높게 나타났다. 따라서 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 것이 동관을 흡수관으로 사용하는 것 보다 PTC 태양열 집열 시스템의 효율에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

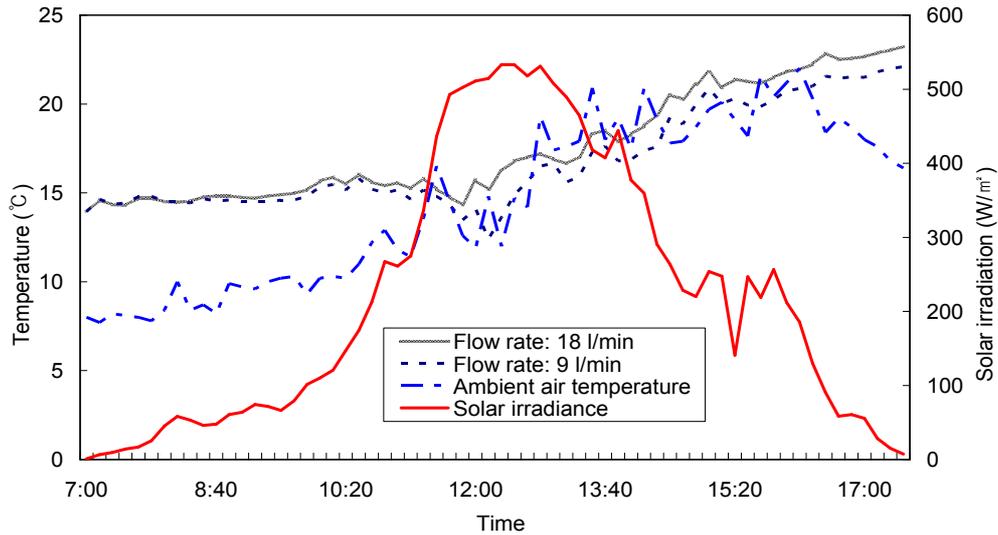


<그림 1-10> 흡수관인 스테인리스관과 동관이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.

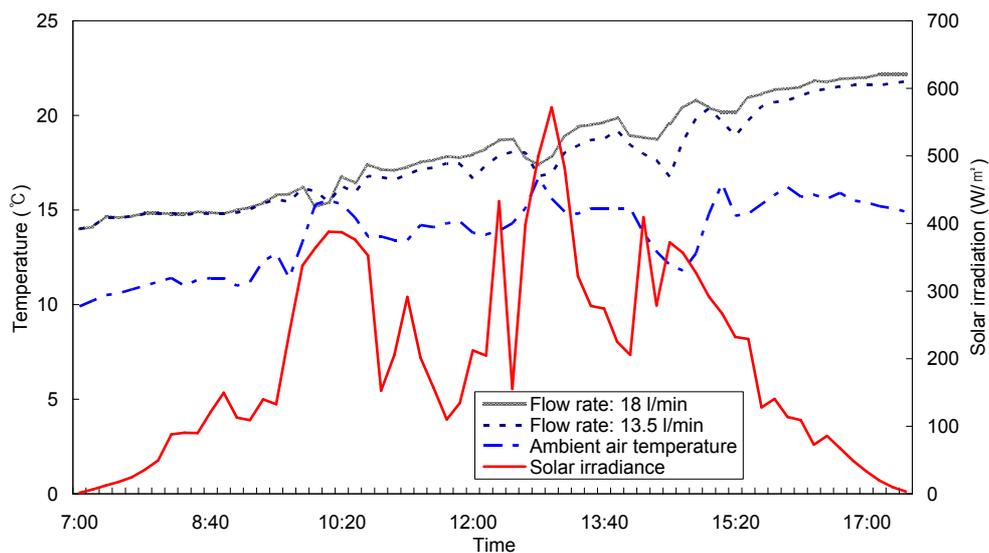
### (3) 흡수관 내 유체순환 유량이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향 분석

본 연구에서 성능이 가장 우수한 것으로 분석된 스테인리스관을 동일하게 2개의 PTC 태양열 집열 시스템의 흡수관으로 사용하면서 2개의 PTC 태양열 집열 시스템의 흡수관으로 순환하는 유체(물)의 유량을 각각 18ℓ/min과 9ℓ/min로 다르게 하여 유량의 크기가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 효과를 분석하였다. 그림 1-11에 나타낸 것과 같이 유체 순환유량이 18ℓ/min일 경우가 9ℓ/min일 때 보다 축열조 내 유체의 온도상승 효과가 컸으며 최대 2.8°C 높게 상승한 것으로 나타났다. 즉 PTC 태양열 집열 시스템 성능은 흡수관 내를 순환하는 유체의 유량이 18ℓ/min일 때가 9ℓ/min경우 보다 우수함을 나타내었다. 또한 동일한 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템의 흡수관으로 순환하는 유체의 유량을 각각 18ℓ/min과 13.5ℓ/min로 다르게 하여 유량의 크기가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 효과를 분석하였다. 그림 1-12에 나타낸 것과 같이 유체 순환유량이 18ℓ/min일 경우가 13.5ℓ/min일 때 보다 축열조 내 유체온도가 최대

2.5°C 높은 것으로 나타났다. 따라서 PTC 태양열 집열 시스템 성능은 흡수관 내를 순환하는 유체의 유량이 18ℓ/min일 때가 13.5ℓ/min경우 보다 좋은 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 종합하면 흡수관으로 순환하는 유체의 유량이 18ℓ/min일 경우가 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 가장 우수한 효과를 나타내었다.



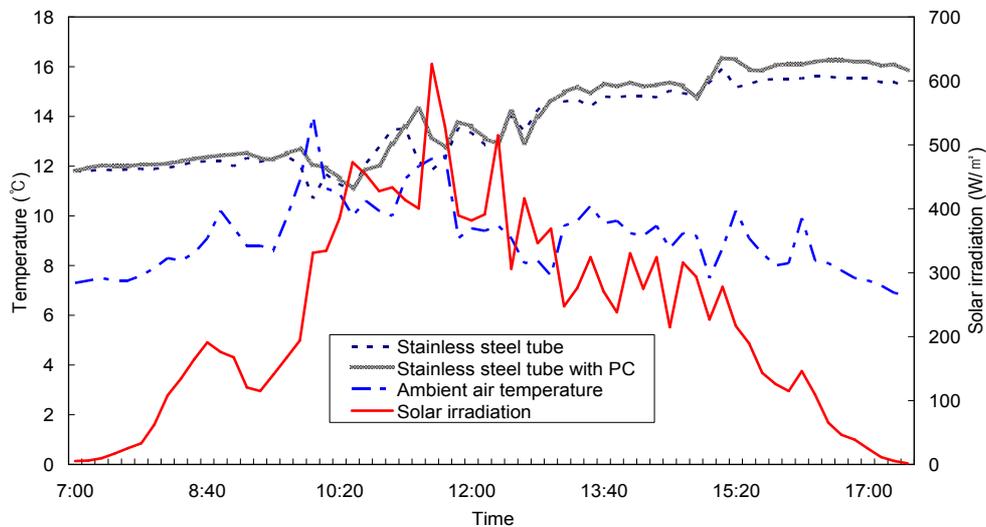
<그림 1-11> 흡수관 내 유체순환 유량(18 ℓ/min 및 9 ℓ/min)이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.



<그림 1-12> 흡수관 내 유체순환 유량(18 ℓ/min 및 13.5 ℓ/min)이 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(4) 흡수관 외부에 PC관 설비 유·무가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 영향 분석

스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 두개의 PTC 태양열 집열 시스템 중 하나의 집열 시스템의 흡수관 외부에 투명한 폴리카보네이트관(PC관)을 설치하여 흡수관 외부에 PC관 설비 유·무가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 PC관의 설비는 흡수관에 집열된 태양복사열이 대기로 대류에 의해 손실되는 것을 막기 위한 것으로 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 PC관의 설비 효과를 분석하기 위한 것이다. 그림 1-13과 같이 흡수관 외부에 PC관 설비를 한 PTC 태양열 집열 시스템이 PC관 설비를 하지 않은 시스템보다 축열조 온도가 최대 2.1°C가 더 높게 나타났다. 따라서 흡수관 외부에 PC관 설비를 한 PTC 태양열 집열 시스템의 효율이 PC관 설비를 하지 않은 시스템보다 더 우수한 것으로 나타나 PC관 설비가 흡수관에 집열된 태양복사열의 대기로의 대류 열손실을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.



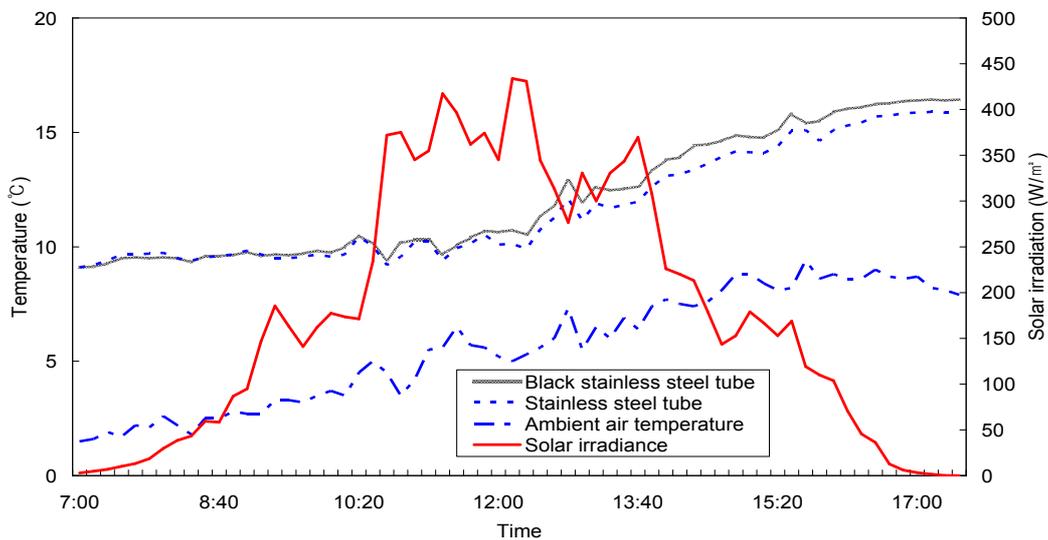
<그림 1-13> 흡수관 외부에 PC관 설비 유·무가 PTC 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(5) 흡수관 흑색코팅 유·무가 PTC 태양열 집열 시스템 성능에 미치는 영향 분석

(가) 스테인리스 흡수관과 도색 스테인리스 흡수관의 성능 비교

두개의 PTC 태양열 집열 시스템 중 하나의 시스템은 흡수관 외부에 흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하였으며, 다른 하나의 시스템은 도색이 되어 있지 않는 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하여 흡수관의 흑색코팅 유·무가 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 미치는 영향 분석하였다.

본 연구에서는 흡수관의 외부를 흑색으로 도색함으로써 무 코팅된 흡수관에 비해 태양 복사열을 흡수관에 얼마만큼 효율적으로 흡수할 수 있는가를 조사하기 위한 것이었다. 그림 1-14와 같이 흑색 코팅된 흡수관을 설비한 PTC 태양열 집열 시스템은 무 코팅된 흡수관을 설비한 시스템보다 축열조 온도가 최대 1.1°C가 더 높게 나타났다. 따라서 흑색으로 도색된 흡수관을 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템의 효율이 도색을 하지 않은 흡수관을 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템에 비해 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 흑색으로 도색된 흡수관을 사용함으로써 태양복사열을 흡수관에 효율적으로 집열 할 수 있을 것으로 판단된다.

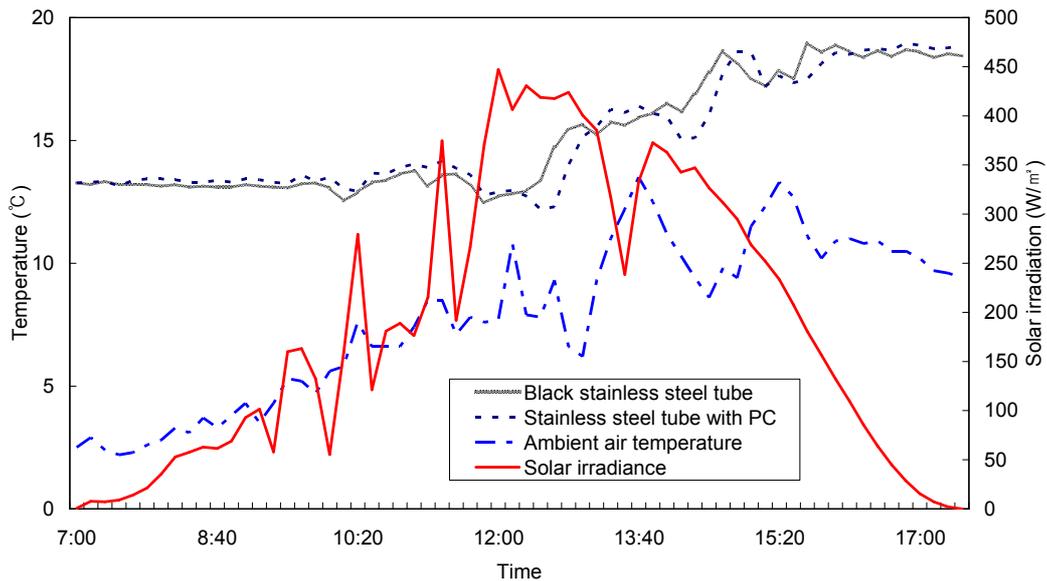


<그림 1-14> 흡수관인 스테인리스관의 흑색코팅 유·무가 태양열 집열시스템 성능에 미치는 영향.

#### (나) PC관 외장 스테인리스 흡수관과 도색 스테인리스 흡수관의 성능 비교

흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템과 PC관을 외부에 장착한 도색이 되어 있지 않는 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템의 효율을 비교 및 분석하였다. 그림 1-15에 나타낸 것과 같이 태양 복사열이 약한 오전에는 PC관을 장착한 무코팅 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율이 흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율보다 약간 우수한 것으로 나타났으며, 이는 스테인리스관 외부에 PC관을 설비함으로써 인체 대기로의 열 손실이 다소 줄어든 결과인 것으로 판단된다. 그러나 태양 복사열이 증가하기 시작하는 오후부터는 흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템과 PC관을 외부에 장착한 도색이 되어 있지 않는 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템은 시간에 따라 집열 시스템 효율의

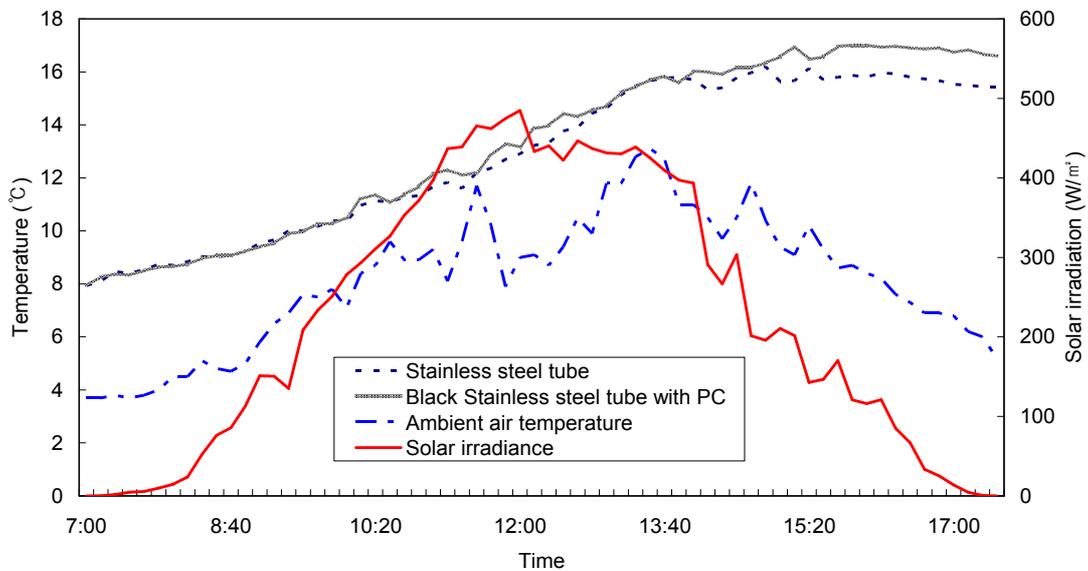
크기가 서로 교차되어 다르게 나타나 시스템 간 효율의 우수성을 비교할 수 없었다. 따라서 이는 두 PTC 태양열 집열 시스템에 있어 스테인리스 관을 도색함으로써 인한 복사열의 흡수율을 높이는 효과와 도색은 되어 있지 않으나 스테인리스관에 PC관을 설비함으로써 인해 대기로의 열손실을 줄이는 효과가 유사하게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 1-15> PC관 외장 스테인리스 흡수관과 도색 스테인리스 흡수관이 집열 시스템 성능에 미치는 영향.

(다) 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관의 성능 비교

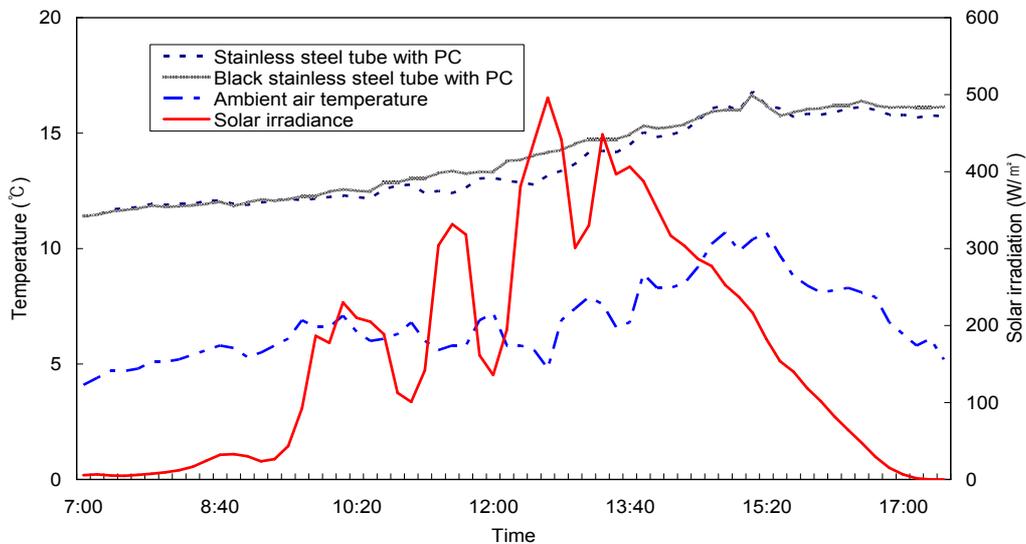
본 연구에서는 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율과 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율을 비교 및 분석하였다. 그림 1-16과 같이 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템이 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템에 비해 축열조 온도가 최대 1.4°C가 더 높게 나타났다. 특히 실험시작 약 3시간 후부터는 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율이 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율에 더 우수한 것으로 나타났으며, 이는 흡수관의 외부를 흑색으로 도색함으로써 인해 태양열 복사에너지를 최대로 흡수함과 함께 흡수관 외부에 PC관을 장착함으로써 대기로의 흡수관에 집열된 열에너지의 열손실을 최소화시킨 결과로 생각된다.



<그림 1-16> 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관이 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(라) PC관 외장 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관의 성능 비교

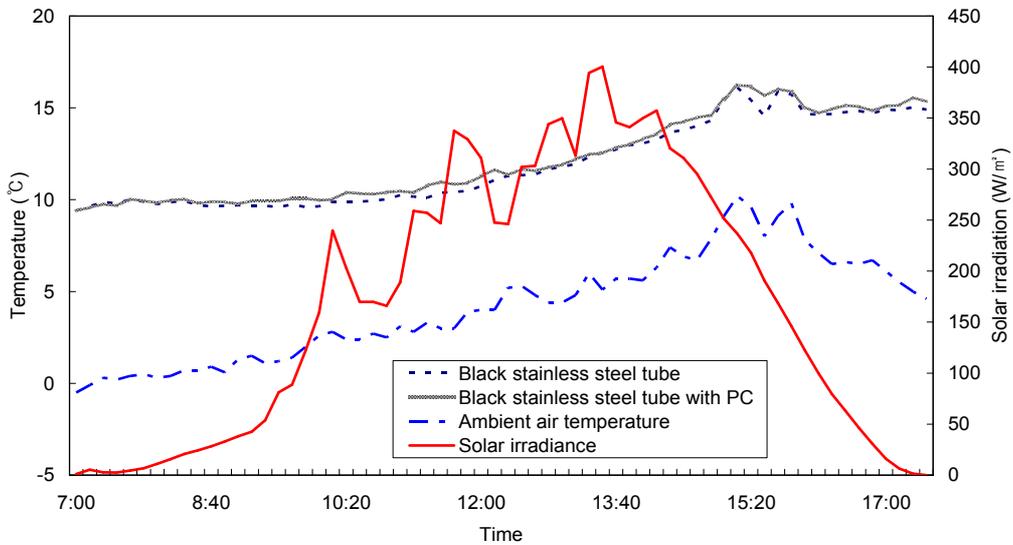
본 연구에서는 PC관을 외부에 장착한 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율과 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율을 비교 및 분석하였다. 그림 1-17과 같이 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템이 PC관을 외장 한 무 도색의 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템에 비해 축열조 온도가 최대 1.3°C가 더 높게 나타났다. 따라서 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템 효율이 PC관을 외부에 장착한 무 도색의 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템의 효율에 비해 다소 우수한 것으로, 이는 흡수관의 외부를 흑색으로 도색함으로써 태양 복사에너지를 최대로 흡수하게 한 효과인 것으로 생각된다.



<그림 1-17> PC관 외장 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관이 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(마) 도색 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관 성능 비교

본 연구에서는 흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템과 PC관을 외부에 장착한 도색 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템의 효율을 비교 및 분석하였다. 그림 1-18에 나타난 것과 같이 주간의 일사량이 대체로 매우 낮아 두 태양열 집열 시스템 효율을 비교하기에는 다소 미흡하였으나, PC관을 장착한 도색 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템이 흑색으로 도색된 스테인리스 관을 흡수관으로 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템에 비해 축열조 온도가 최대 1.1°C가 높아 효율이 다소 우수한 것으로 나타났다. 이는 두 PTC 태양열 집열 시스템에 있어 집열관인 스테인리스 관을 도색함으로 인한 복사열의 흡수율을 높이는 효과가 있었으나, 도색 스테인리스관에 PC관을 설치한 집열관을 사용하는 PTC 태양열 집열 시스템은 PC관 설비로 인해 대기로의 열손실을 줄이는 효과가 추가되었기 때문에 집열 시스템 효율이 향상된 것으로 판단된다.



<그림 1-18> 도색 스테인리스 흡수관과 PC관 외장 도색 스테인리스 흡수관이 집열시스템 성능에 미치는 영향.

(바) PTC 집열시스템 축열조의 축열 성능분석

본 연구는 오전 11시부터 오후 2시까지 10분 간격으로 일정한 순환유량(180 ℓ/min)하에서 단위시간(10분) 마다 축열조에 축적되는 축열량을 분석하였다(그림 4-19). 축열량 분석은 다음의 (4-3) 식을 이용하였다.

$$Q = mC_p\Delta T \text{ ----- (1-3)}$$

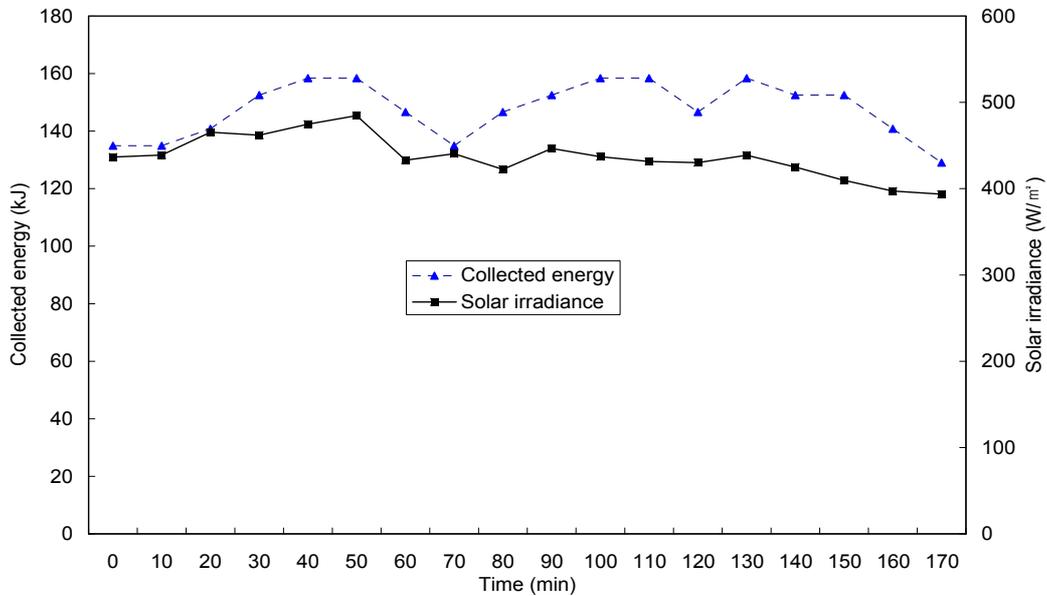
여기서,

Q = 축열량(kJ)

C<sub>p</sub> = 물의 비열(4.19kJ/kg °C)

ΔT = 축열 전후의 온도차(°C)

그림 1-19에 나타난 바와 같이 10분 간격의 축열량 평균값은 140.01 kJ이 있으며, 태양 일사량 값의 변화에 따라 130 ~ 160 kJ의 범위에서 대체로 균일한 축열량을 나타내었다. 또한 오전 11시부터 오후 2시까지의 총 축열량은 2660.23 kJ인 것으로 나타났다.



<그림 1 - 19> PTC 집열시스템의 축열성능 분석.

마. 요약 및 결론

본 연구는 PTC형 태양열 집열 시스템의 효율에 영향을 미치는 요인인 흡수관 재료, 흡수관 내를 순환하는 유체 유량의 크기 및 흡수관 외부에 PC관 설비 유무의 효과를 분석하기 위해 수행되었다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 스테인리스관, 아연도금강관, 동관 중 스테인리스관을 PTC 태양열 집열기의 흡수관 재료로 사용할 때 PTC형 태양열 집열 시스템의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 흡수관으로 순환하는 유체의 유량이 18ℓ/min일 경우가 9ℓ/min 및 13.5ℓ/min 일 경우보다 PTC 태양열 집열 시스템의 성능에 가장 우수한 효과를 나타내었다.
- (3) 흡수관 외부에 PC관 설비를 한 PTC 태양열 집열시스템 효율이 PC관 설비를 하지 않은 시스템보다 더 우수한 것으로 나타나, PC관 설비가 흡수관에 집열된 태양복사열의 대기로 대류 열손실을 줄이는데 효과적인 것으로 나타났다.
- (4) 축열조의 10분간 축열량 평균값은 140.01 kJ이 었으며, 태양 일사량 값의 변화에 따라 130 ~ 160 kJ의 범위에서 대체로 균일한 축열량을 나타내었고, 3시간 동안의 총 축열량은 2660.23 kJ인 것으로 나타났다.

### 3. PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델

#### 가. 연구목적

태양에너지는 크게 태양광과 태양열로 나누어 이용할 수 있는데 태양광에 의한 전력 생산이 목적인 PV 모듈과 태양열에 의한 온수 생산이 목적인 태양열 집열기로 구분할 수 있다. 이번 연구에서는 태양열을 이용, 집광 및 집열을 동시에 수행하여 온수를 생산할 수 있는 태양열 집광형 집열기(parabolic trough solar collector, PTC)의 시뮬레이션을 통하여 우리나라에서 적용이 가능한 새로운 에너지원으로서의 가능성에 대한 분석을 실시하였다. 선행된 PTC 관련 연구들을 살펴보면, 증기 생산을 위한 PTC 연구(Kalogirou 등, 1997; Tuma 등, 1999), 전기발전을 위한 PTC 연구(Bakos 등, 2000; You와 Hu, 2002), 염분제거 및 담수화를 위한 PTC 적용(Kalogirou, 1998; Garcia Rodriguez와 Gomez Camacho, 1999; Garcia Rodriguez 등, 1999), 수리 분석을 통한 PTC의 성능 분석(Edenburn, 1976; Kalogirou 등, 1994) 등, 수많은 연구들이 진행되어 왔다. 또한 국내에서 진행된 연구들을 보면, PTC 성능 향상을 위한 연구(Kang 등, 2000), PTC의 열성능 분석(Kwak 등, 1996), PTC형 집열기의 원통형 흡수기에서의 복합열전달에 관한 연구(Chung 등, 2000) 등이 수행되었다.

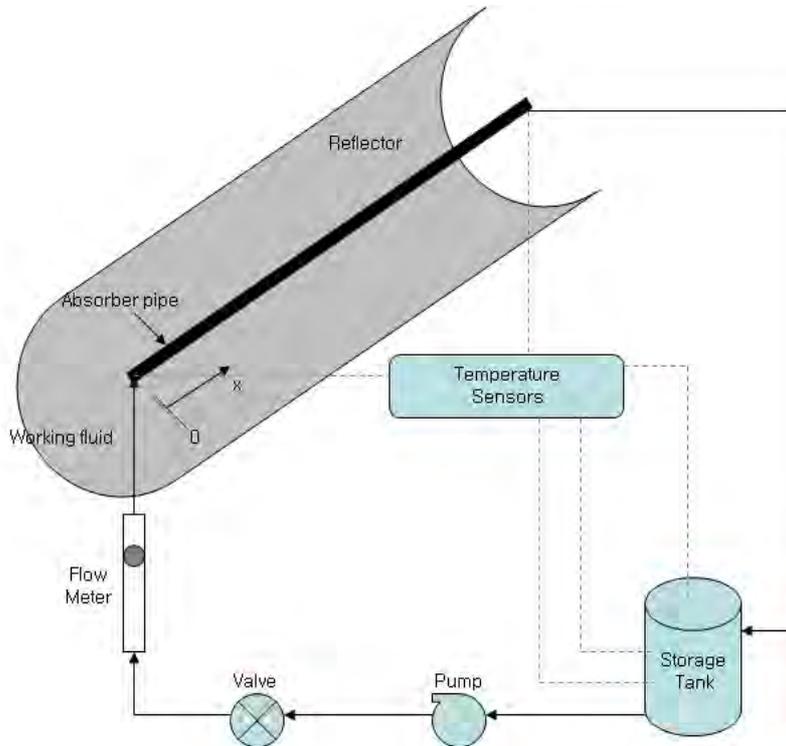
기존의 평판형 집열기는 태양열의 흡수 면적과 방출 면적이 동일하여 집열기로서의 효율을 떨어뜨리는 단점을 가지고 있는 반면, 태양열 집광형 집열기(PTC)는 반사체의 초점선 중심에 위치한 흡수관으로의 집중적 집열을 통해 태양에너지의 열에너지로의 효율적이고 신속한 전환을 통해 100℃ 이상의 중·고온 온수 생산이 용이하다. 따라서 PTC를 통해 생산된 에너지는 농산물 건조기를 가동시키거나 온수의 생산, 전기에너지로의 전환 등 다양한 신재생 에너지의 생산성 향상을 기대할 수 있다. 이를 위해 작동유체 온도의 예측치를 계산하고 실험에 의한 결과치와 비교 분석을 통해 실제 PTC의 효율을 극대화시키고 나아가 안정적인 기능 수행을 할 수 있는 정확한 이론이 정립되어야 한다. 이에 본 연구에서는 열전달 이론인 대류와 복사에 바탕을 둔 에너지 평형 방정식에 기초하여 Matlab 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 통한 PTC의 성능을 예측하고 측정치와 비교·분석하여 정확한 모델을 세우는 데 목적이 있다.

#### 나. 모델 정립

PTC에 흡수되는 태양 에너지와 열전달이 이루어지는 시스템 계에는 흡수관(absorber pipe), 작동 유체(working fluid), 저장탱크(storage tank)가 있다. 흡수관을 흐르는 작동유체의 온도 변화를 예측하기 위해 태양에너지, 작동 유체, 흡수관, 그리고 저장 탱크 사이에서 발생하는 열전달을 통한 에너지 평형 방정식을 정립하여 모델을 완성한다.

(1) PTC 태양열 집열시스템

PTC 태양열 집열시스템은 반원통 모양인 반사판과 흡수관, 그리고 저장탱크로 이루어져 있고 작동유체를 순환시키기 위한 펌프와 파이프로 구성되어 있다(그림 1-20). 흡수관은 반사판의 초점선 중심에 위치한다. 흡수관으로 들어오는 작동 유체는 에너지 교환 후 다시 저장 탱크로 저장되며 펌프에 의해 다시 흡수관을 통해 순환하는 과정을 반복한다.



<그림 1-20> PTC 태양열 집열시스템 개략도.

(2) 흡수관

흡수관의 밀도는 균일하다고 가정한다. 또한 흡수관의 두께는 매우 얇기 때문에 관 내부와 외부 사이에서의 열전달은 없다고 가정한다. 태양에너지와 흡수관과의 열전달, 흡수관과 대기사이의 대류와 복사에 의한 열전달, 그리고 흡수관과 작동유체간의 대류로 인한 열전달이 발생한다. 이에 대한 에너지 평형 방정식은 식(1-4)와 같이 세울 수 있다.

$$A_a k_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \pi \alpha \gamma_r I_w - \pi d_{ao} [h_w (T_a - T_o) + h_{r,sky} (T_a - T_{sky})] - \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w) = \rho_a c_a A_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (1-4)$$

여기서,

$A_a$  = 흡수관 면적( $m^2$ )

$k_a$  = 흡수관의 열전도계수( $W m^{-1} K^{-1}$ )

$T_a, T_w, T_o$  = 흡수관, 작동유체, 공기온도( $^{\circ}C$ )

$\tau a$  = 흡수 · 투과율

$\gamma_r$  = 반사 계수

$I$  = 태양광 강도( $W m^{-2}$ )

$w$  = 반사판 간극(m)

$d_{ao}, d_{ai}$  = 흡수관 외부 직경, 내부직경(m)

$h_w$  = 흡수관 및 공기 사이에서의 대류열전달계수 =  $2.8 + 3.0V$  ( $W m^{-2} ^{\circ}C^{-1}$ )

$V$  = 풍속( $m s^{-1}$ )

$h_{r,sky}$  = 흡수관 및 주변을 둘러싼 대기와의 복사열전달계수

$$= \varepsilon_a \sigma (T_a^2 + T_{sky}^2) (T_a + T_{sky}) \quad (W m^{-2} ^{\circ}C^{-1})$$

$\varepsilon_a$  = 흡수관 방사율

$\sigma$  = Stefan-Boltzmann 상수( $5.6697 \times 10^{-8}$ ,  $W m^{-2} K^{-4}$ )

$$T_{sky} = \text{유효 대기 온도}(^{\circ}C) = (T_o + 273.15) \left[ \frac{(T_d + 200)}{250} \right]^{1/4} - 273.15$$

$T_d$  = 노점온도( $^{\circ}C$ )

$\rho_a$  = 흡수관의 밀도( $kg m^{-3}$ )

$c_a$  = 흡수관의 비열( $J kg^{-1} ^{\circ}C^{-1}$ )

$h_i$  = 작동유체와 흡수관 사이에서의 대류열전달계수( $W m^{-2} ^{\circ}C^{-1}$ )

$$h_i = \frac{Nu \cdot k_a}{L}, \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad Re = \frac{4 \dot{m}_w}{\pi d_{ai} \mu_w}$$

여기서,

$L$  = 흡수관의 길이(m)

$\dot{m}_w$  = 작동유체의 질량유량( $kg s^{-1}$ )

$\mu_w$  = 작동유체 점성계수( $kg m^{-1} s^{-1}$ )

### (3) 작동 유체

작동 유체는 흡수관 내를 완전하게 채워 통과한다고 가정한다. 작동 유체의 유량은 일정한 것으로 가정하고 흡수관과 작동유체의 열전달은 대류만 일어난다. 이에 대한 에너지 평형 방정식은 식(4-5)와 같다.

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \dot{m}_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w) \quad \text{-----} \quad (1-5)$$

여기서,

$\rho_w, c_w, A_w$  = 작동유체의 밀도, 비열, 열전달 면적( $\text{kg m}^{-3}$ ,  $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\text{m}^2$ )

#### (4) 저장탱크

저장탱크로 유입되는 작동유체의 유량과 펌프에 의해 송출되는 유량은 항상 일정하고, 저장탱크내의 작동유체는 잘 혼합되어 있다고 가정한다. 저장 탱크의 온도변화는 유입 및 송출되는 작동유체의 열에너지에 의해 결정된다. 작동유체와 저장탱크 사이에 발생하는 열전달을 기준으로 에너지 평형 방정식을 적용하면 식(1-6)이 성립된다.

$$m_s c_w \frac{dT_s}{dt} = \dot{m}_w c_w (T_w - T_s) \quad \text{-----} \quad (1-6)$$

여기서,

$m_s$  = 저장 탱크 내부의 물의 질량(kg)

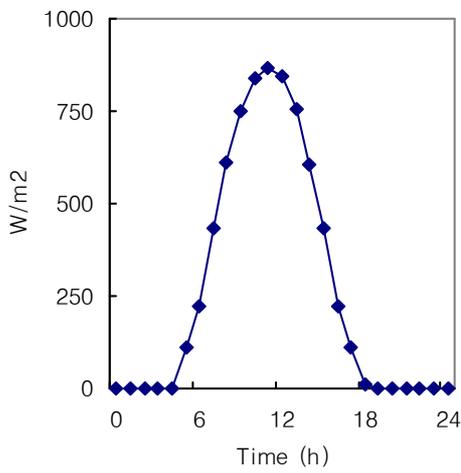
$T_s$  = 저장 탱크 내부의 물의 온도( $^\circ\text{C}$ )

#### 다. 시뮬레이션 구현

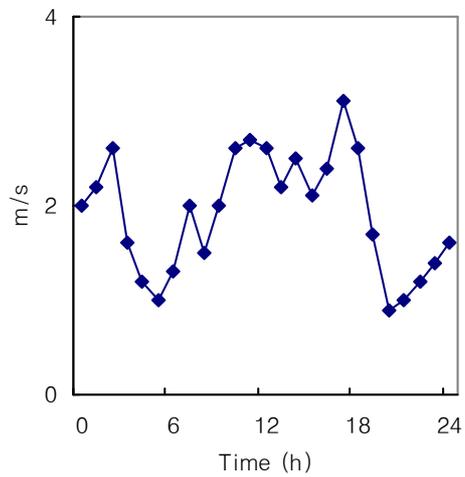
시뮬레이션을 구현하기 위하여 Matlab v.6.5.0 (The MathWorks, Inc. Software License Agreement)이 사용됐으며 Microsoft Excel 2003 V11.5 (Microsoft Corporation)은 기상 데이터 및 측정 자료 관리에 사용되었다. 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 기존의 실험을 통한 연구결과와 비교 분석이 수행되었다. 참고문헌(Eskin, 1988)에 쓰인 기상 데이터는 그림 1-21과 같고 명시되어 있지 않는 풍속, 대기온도, 상대습도는 우리나라 2009년 9월 29일에 측정된 기상 데이터를 이용하였다. 그리고 참고문헌에 쓰인 주요 변수들은 표 1-2에 나타내었고 이를 이용해 시뮬레이션을 구현하였다.

<표 1-2> 시뮬레이션에 사용된 주요 변수(Eskin, 1988)

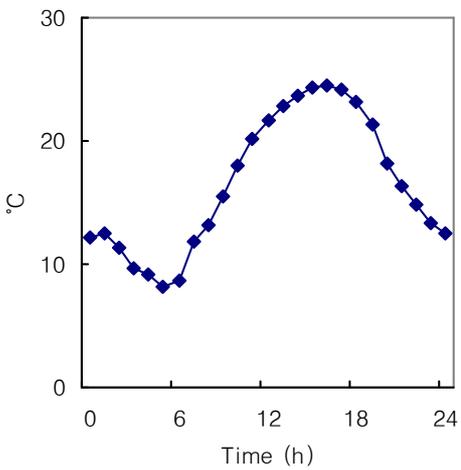
Symbols	Parameters	Value	Unit
$d_I/d_O$	inner and outer diameter of absorber pipe	0.042/0.037	m
$\rho_a$	density of absorber pipe	7854	$Kg\ m^{-3}$
$c_{pw}$	specific heat of working fluid	3000	$J/Kg\ ^\circ C$
$\varepsilon_a$	emissivity of absorber pipe	0.9	
CR	concentration ratio	48	



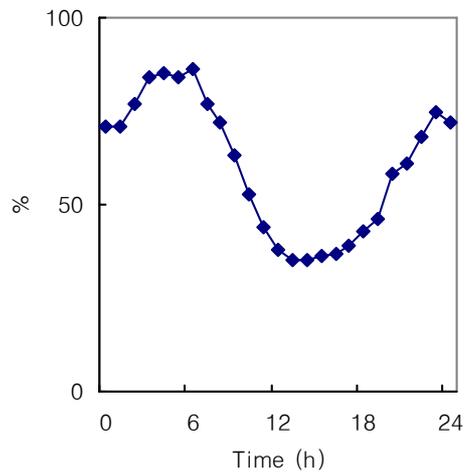
(a) 태양강도



(b) 풍속



(c) 대기 온도

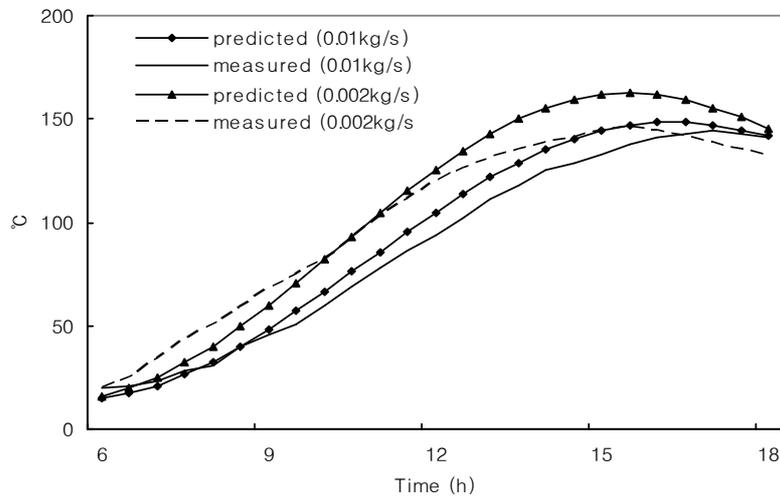


(d) 상대습도

<그림 1-21> 기상 자료.

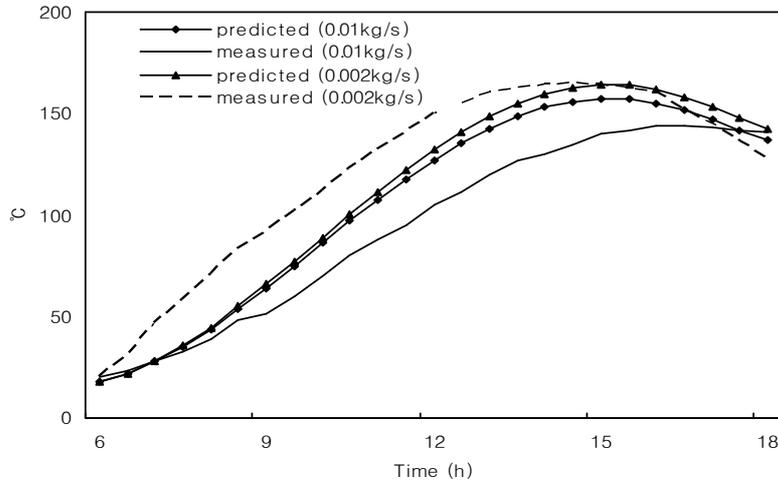
## 라. 결과 및 고찰

참고문헌에서 사용된 유량이 0.01kg/s때와 0.002kg/s, 두 가지 경우를 분석하였다. 유량이 0.01kg/s 일 때, 오전 9시부터 작동 유체의 예측값과 측정값의 차이가 12℃ 정도를 시작으로 15시경 21℃로 가장 큰 차이가 발생했다. 18시 경, 141℃로 일치하는 것을 볼 수 있었다(그림 1-22). 유량이 0.002kg/s일 때, 10시에서 12시에는 유사한 값을 나타내었으며 15시경에 24℃로 가장 큰 차이를 나타내었다. 18시 경에는 130℃에 근접하지만 약 10℃ 정도 차이가 발생하였다(그림 1-22). 유량이 0.002kg/s 일 때 작동 유체의 최고온도가 더 높은 이유는 유량이 0.01kg/s때 보다 5배가 적게 흐르기 때문에 흡수관에서부터 단위 길이당 작동유체가 흡수하는 에너지가 많아지기 때문이다.



<그림 1-22> 작동유체의 측정 온도 및 예측 온도 값 비교.

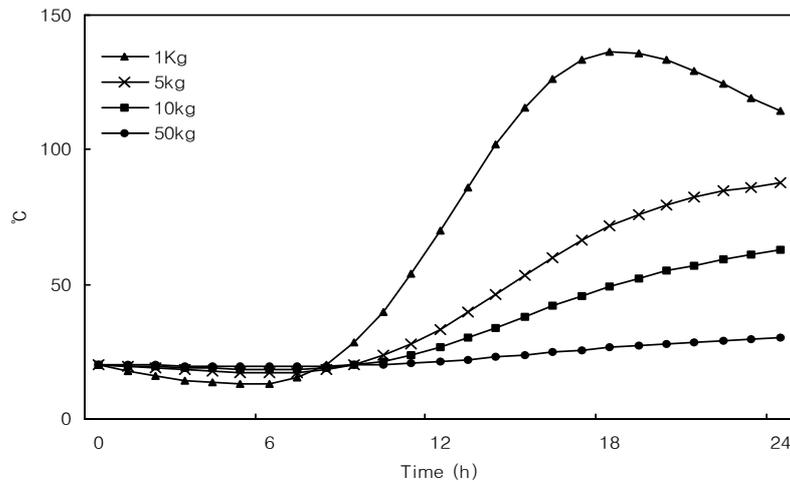
측정된 흡수관 온도와 예측값을 비교해 보면, 유량이 0.01kg/s 일 때, 8시경부터 서서히 온도차가 발생하기 시작하여 15시경에 25℃로 최대 차이가 발생했다. 17시 이후, 예측된 온도가 참고문헌의 온도보다 낮게 떨어졌다(그림 1-23). 0.002kg/s일 때, 오전 6시 이후 온도차이가 발생했다. 15시 이후, 예측된 온도가 참고문헌보다 낮게 나타났다(그림 1-23). 유량에 따른 흡수관의 온도변화에서 예측값이 실험값보다 낮아지는 시점이 유량이 0.002kg/s일 때가 빠른 이유는 유량이 5배 작아진 만큼 단위 질량당 열전달의 양이 더 많아 빠르게 온도 변화가 일어나기 때문이다.



<그림 1-23> 흡수관의 측정 온도 및 예측 온도 값 비교.

작동 유체와 흡수관의 측정된 온도와 예측값에서 차이가 발생하는 이유는, 먼저, 시뮬레이션에 사용된 기상 데이터의 차이를 들 수 있다. 참고 문헌에는 태양 복사량만이 보고되어 있고 그 밖의 날씨 정보가 기록되어 있지 않아 우리나라의 특정한 날의 기상 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 구현하였기 때문에 측정값과 예측값의 차이가 발생하였다고 사료되고, 또한, 시뮬레이션에 필요한 변수들 중에 참고 문헌에 기록되어 있지 않은 것들이 많아 표 1-1에 명시되어 있는 것들 외에는 주어진 상황에 가장 적절하다고 판단되는 값들로 가정하였기 때문에 이 부분에서 또한 차이가 발생하였다고 생각된다. 좀 더 확실한 시뮬레이션의 검증을 위해서는 직접 PTC를 설치하여 모든 입력 변수들과 날씨 데이터를 확보, 실험을 통한 측정값과 비교, 분석하는 것이 가장 정확하다고 볼 수 있다.

저장 탱크 용량의 변화에 따른 저장 탱크 내의 작동 유체의 온도 변화를 살펴 보면, 탱크 내 유체의 질량이 1kg 일 때 최대 온도가 140℃ 정도로 가장 높이 증가하였고, 질량 5kg 이상부터는 작동유체의 온도를 따라서 증가하지 못하고, 50kg에서는 온도 변화가 거의 발생하지 않았다(그림 1-24). 유입되는 작동유체의 질량이 저장 탱크 내 유체의 질량에 비하여 너무 작기 때문에 질량이 증가할수록 온도 상승 폭이 작아진다.



<그림 1-24> 저장 탱크의 용량 변화에 따른 저장 탱크 내 작동 유체의 온도 변화.

#### 마. 요약 및 결론

본 연구에서는, PTC의 시뮬레이션을 통하여 실험에서 얻어진 결과와 비교 분석하여 PTC 성능을 분석하는데 그 목적이 있다. 분석하는 과정에서 흡수관, 작동유체 및 저장탱크는 각각의 독립된 에너지 평형 방정식으로 고려되었다. 작동유체와 흡수관의 온도는 실험값과 예측값이 유사한 흐름을 나타내었고, 저장 탱크 내 유체의 온도변화는 일정한 유속에서 탱크의 용량이 커지면서 온도 상승이 감소하였다.

작동 유체와 흡수관의 측정값과 예측값의 차이가 발생하였는데, 이는 실험에 이용된 기상 데이터와 각종 입력 변수들 중에 상당 부분이 가정에 의한 것에서 기인하였다고 볼 수 있다. 모델링의 검증은 위해서는 직접 PTC를 설치하여 실험을 통한 측정값과 시뮬레이션을 통한 예측값의 비교를 통한 정확한 분석이 수행되어야 할 것이다.

### 4. PTC 태양열 집열시스템 시뮬레이션 모델 검증 및 성능분석

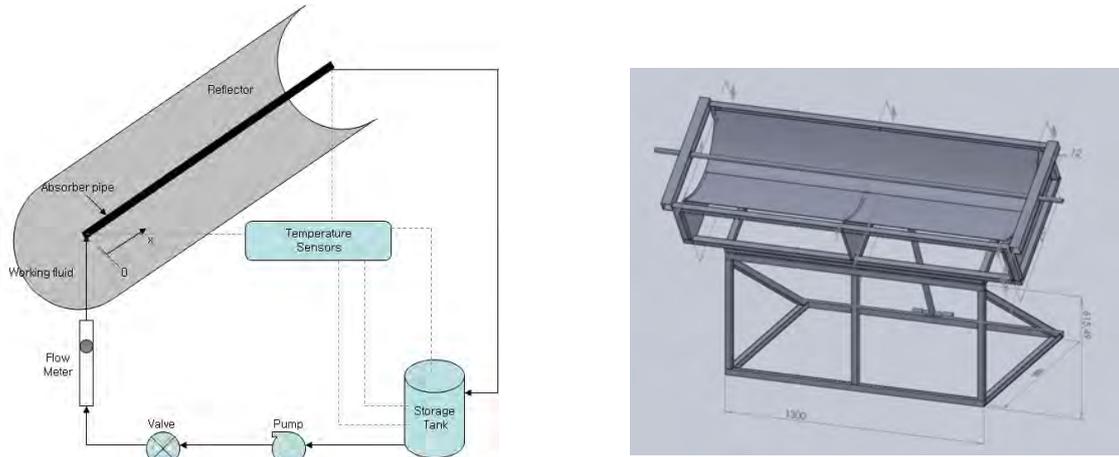
#### 가. 연구 목적

PTC를 통해 생산된 에너지는 곡물 건조기를 가동시키거나 온수의 생산, 전기에너지로의 전환 등 다양한 신재생 에너지의 생산성 향상을 기대할 수 있다. 이를 위해 작동유체 온도의 예측 값을 계산하고 실험에 의한 결과와 비교 분석을 통해 실제 PTC의 효율을 극대화시키고 나아가 안정적인 기능 수행을 할 수 있는 정확한 이론이 정립되어야 한다. 따라서 본 연구는 열전달 이론인 대류와 복사에 바탕을 둔 에너지 평형 방정식에 기초하여 Matlab 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 통한

PTC 태양열 집열시스템의 성능을 예측하고 측정값과 비교·분석하여 모델을 검증하는데 목적이 있다.

나. 열전달 모델

PTC에 흡수되는 태양 에너지와 열전달이 이루어지는 시스템 계에는 흡수관( absorber pipe), 작동 유체(working fluid), 축열조(storage tank)가 있다(그림 1-25). 흡수관을 흐르는 작동유체의 온도 변화를 예측하기 위해 태양에너지, 작동 유체, 흡수관, 그리고 축열조 사이에서 발생하는 열전달을 통한 다음의 에너지 평형 방정식을 정립하여 모델을 완성하였다.



<그림 1-25> PTC 태양열 집열시스템.

(1) 흡수관( absorber pipe)

$$A_a k_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \tau \alpha \gamma_r I_w - \pi d_{ao} [h_w (T_a - T_o) + h_{r,sky} (T_a - T_{sky})] - \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w) = \rho_a c_a A_a \frac{\partial T_a}{\partial t}$$

(2) 작동유체(working fluid)

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \dot{m}_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w)$$

(3) 축열조(storage tank)

$$m_s c_w \frac{dT_s}{dt} = \dot{m}_w c_w (T_w - T_s)$$

#### 다. 실험 방법

PTC 태양열 집열시스템은 집열부, 반사부, 받침대, 펌프, 축열조, 및 배관으로 구성 되어 있다(그림 1-25). 축열조의 물은 펌프를 지나 집열관을 통과하여 다시 축열조로 들어오는 순환형으로 되어 있으며, 유량은 18ℓ/min으로 하여 실험을 수행하였다. 제작된 PTC의 크기는 표 1-3과 같고 실험은 2009년 10월 21일, 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 3층 건물의 옥상에서 진행되었다. 기상관측자료는 옥상에 설치된 기상관측장비(Watchdog 2000 series, Spectrum Technologies Inc., USA )를 사용하여 수집하였다(그림 1-26).

<표 1-3> PTC 크기

Parameters	Dimensions
Focal length	130 mm
Rim angle	90°
Parabola length	1600 mm
Parabola aperture	520 mm
Parabola arc length	596.8 mm

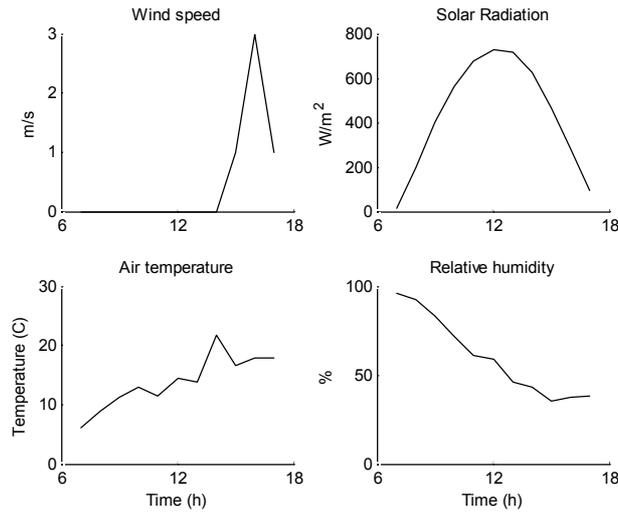


<그림 1-26> 기상자료 획득을 위한 기상관측 장비.

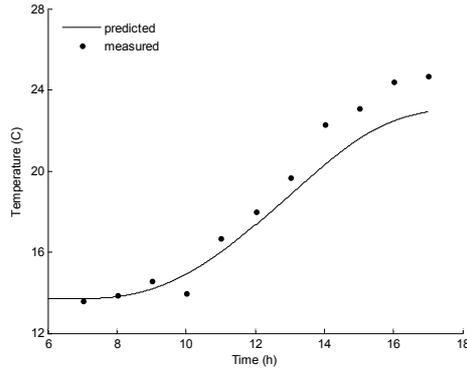
#### 라. 결과 및 고찰

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실험을 통한 연구결과와 비교 분석이 수행되었다. 시뮬레이션을 구현하기 위해 측정된 기상 데이터는 그림 1-27과 같다. 흡수관을 흐르는 작동유체의 온도 변화를 살펴보면, 약 14℃의 초기 온도로부터 태양 복사량이 상승하는 시기(9:00 AM)와 일치하여 유체의 온도가 상승하기 시작하고 태양 복사가 하강하는 지점에서도 계속해서 상승하고 난후 일몰 후에 온도 상승의 정

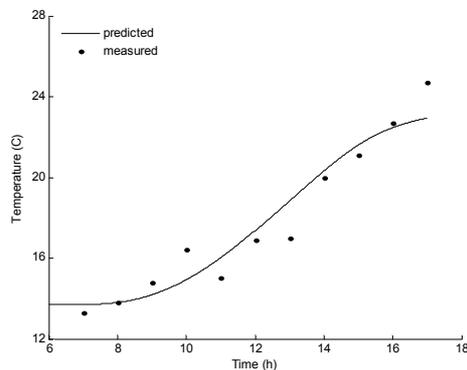
도가 적어지는 것으로 나타났다. 이는 반사판에 의해 집광, 집열된 태양 복사 에너지가 최 정점에 도달하지 않더라도 충분히 유체의 온도를 상승시킬 수 있는 에너지를 가지고 있다고 생각할 수 있다. 작동 유체는 25℃까지 상승하였고, 시뮬레이션과 실험결과가 상당히 유사한 흐름을 나타내었다(그림 1-28). 축열조 내의 작동유체의 온도 변화도 시뮬레이션과 실험결과가 상당히 일치함을 보이고 있다(그림 1-29).



<그림 1-27> 측정 기상자료.



<그림 1-28> 작동유체의 측정 온도 및 예측 온도 값 비교.



<그림 1-29> 저장탱크 내 작동유체의 측정 및 예측 온도 값 비교.

작동유체의 온도 상승 폭이 크지 않은 이유는 실험 당일의 기상을 들 수 있다. 실험일은 10월 21일로 늦은 가을에 해당하며, 실제로 최대 태양복사량이  $700\text{W/m}^2$  정도 밖에 안 되었고, 공기의 온도도  $20^\circ\text{C}$ 를 넘지 않았기 때문에 작동유체에 전달할 수 있는 에너지량이 충분하지 않았다고 볼 수 있다. 정확한 분석을 위하여, 태양복사량이 상대적으로 강한 여름철에 실험을 실시하고 더불어 좀 더 정밀한 PTC를 제작하여 시뮬레이션과 실험 결과의 오차를 줄이는 것에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### (5) 요약 및 결론

본 연구에서는, PTC의 시뮬레이션을 통하여 실험에서 얻어진 결과와 비교 분석하여 PTC 성능을 분석하는데 그 목적이 있다. 분석하는 과정에서 흡수관, 작동유체 및 축열조는 각각의 독립된 에너지 평형 방정식으로 고려되었다. 흡수관 내를 흐르는 작동유체의 온도는 실험값과 예측값이 유사한 흐름을 나타내었고, 축열조 내 유체의 온도변화도 역시 서로 근접한 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 작동 유체의 온도 상승이 적은 이유는 실험 당일의 기상과 밀접한 관계가 있다. 늦은 가을에 실험이 진행되었기 때문에 상대적으로 적은 태양복사량으로 인해 유체에 전달할 수 있는 에너지의 부족으로 큰 폭의 온도 상승은 기대할 수 없었다.

## 제 2 절 실증 실험용 PTC형 태양열 집열 시스템 개발

### 1. PTC형 태양열집열기 설계 및 제작

집광형 집열기의 경우 집광율이 10이상이어야 하며, 직접적인 복사광만을 이용하는데 태양복사광을 받아들이는 반사판의 개구부 면적이 넓어서 많은 복사광을 집열시킬 수 있는 반면 집열된 열을 방출하는 흡수부의 면적이 적기 때문에 열손실이 줄어들어 중고온용에 이용될 수 있어야만 한다. PTC형 태양열집열기의 가장 중요한 부분인 반사판은 태양광을 집광부로 반사시켜 태양열을 선으로 집열하는 부분으로 PTC 반사판을 다음의 식 (2-1)을 이용하여 곡면을 설계 및 제작하였다.

$$y = \frac{x^2}{4f} \text{ ----- (2-1)}$$

식(2-1)에서  $f$ 는 태양광이 초점에 모이는 초점을 나타낸다. 본 연구에서는 미리 설정한 립각에 맞게 초점거리를 정한 후 포물선의 식 (2-1)에 따라 곡율을 계산하여 PTC 반사판을 후면에서 지지할 수 있도록 반사판이 부착될 지지대의 설계에 이용하였다(그림 2-1). 또한 반사판 지지대 양쪽 끝에 구조용 스테인리스 사각파이프 (20×20 mm)를 고정하여 반사판의 초점에 맞게 흡수관을 고정할 실린더를 설치하였다(그림 2-1). PTC형 반사판이 부착될 지지대는 2 mm 두께의 스테인리스 평철을 표 5-1에 나타낸 것과 같이 x축 좌표 값을 50 mm씩 증가시키면서 그에 대응하는 y축 값에 따라 곡율에 맞게 포물형으로 레이저 가공하여 사용하였다. 반사판은 93.5%의 반사율을 갖는 알루미늄 세라믹 나노 코팅 제품(Solar Surface 992, Alcan Co., Canada)을 사용하였다(그림 2-2). 또한 반사판 호의 길이 S는 아래의 식 (2-2)를 이용하여 계산하였다.

$$S = 2f \left[ \sec \frac{\phi_r}{2} \tan \frac{\phi_r}{2} + \left( \ln \left( \sec \frac{\phi_r}{2} \tan \frac{\phi_r}{2} \right) \right) \right] \text{ ----- (2-2)}$$

식 (2-2)에서  $\phi_r$ 은 립각을 나타내며, 본 연구에서는 73°로 설정하였다. 본 연구에서 제작한 PTC 반사판 호의 길이(S)는 2450.4 mm이고, 길이는 1,868 mm이다(그림 2-2). PTC형 반사판은 반사판 지지대 위에 두께 0.64 mm의 3M 양면테이프를 이용하여 고정하였고, 반사판의 초점에 맞게 집열관을 원통형 집열관 지지대에 고정하였다. 제작된 PTC형 태양열 집열기는 그림 2-3과 같으며, 설계도면은 그림 2-4와 같고, PTC형 태양열집열기의 제원은 표 2-2에 나타내어져 있다.

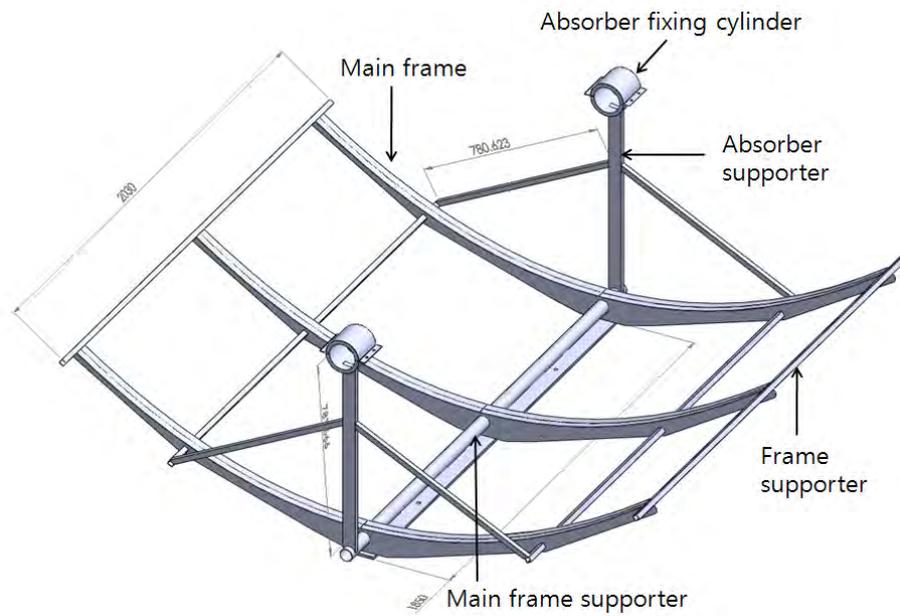


그림 2-1. PTC형 반사판 지지대.

<표 2-1> PTC 반사판 프레임 제작 시 사용된 좌표

x (mm)	y (mm)
0	0
50	0.799233
100	3.196931
150	7.193095
200	12.78772
250	19.98082
300	28.77238
350	39.1624
400	51.1509
450	64.73785
500	79.92327
550	96.70716
600	115.0895
650	135.0703
700	156.6496
750	179.8274
800	204.6036
850	230.9783
900	258.9514
950	288.523
1000	319.6931
1050	352.4616
1100	386.8286
1150	422.7941

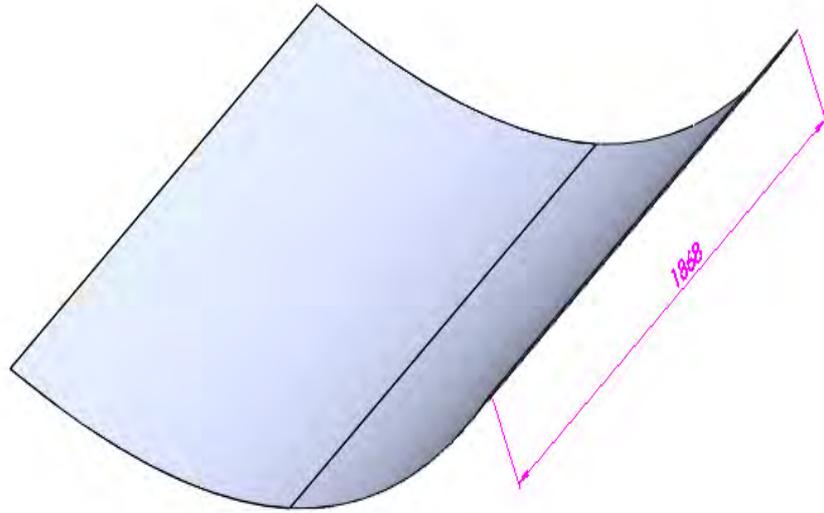
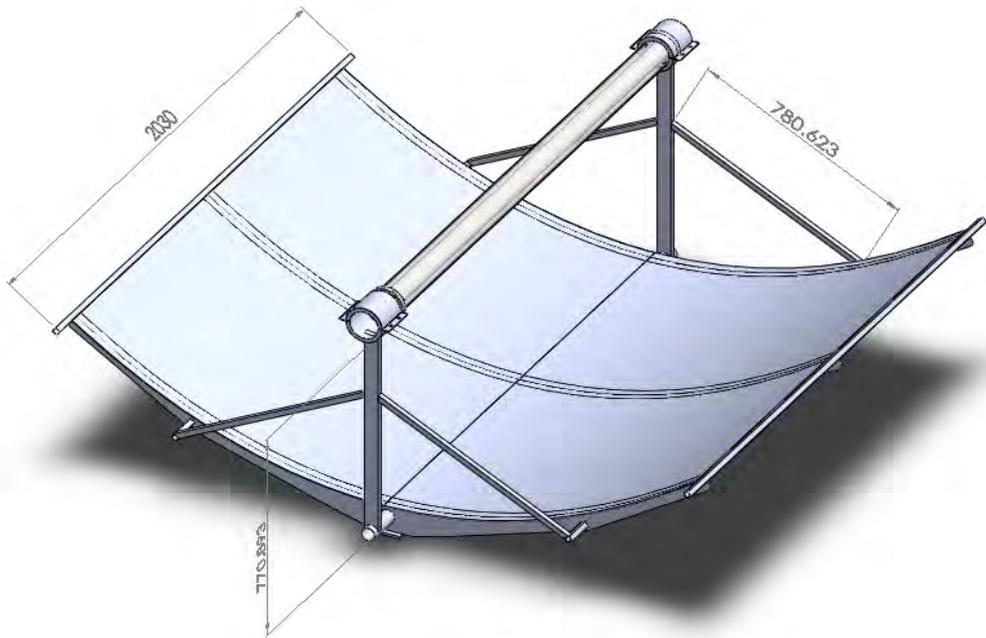
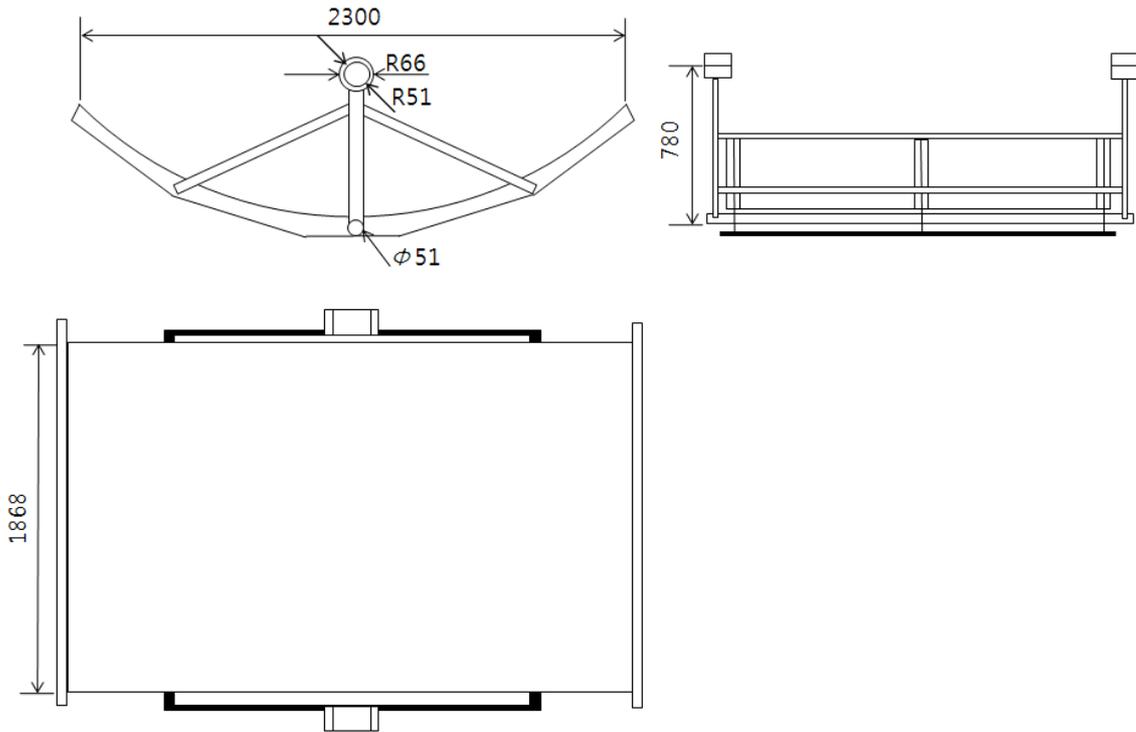


그림 2-2. PTC형 반사판.



<그림 2-3> PTC형 태양열집열기의 주요 구성부분의 구조.



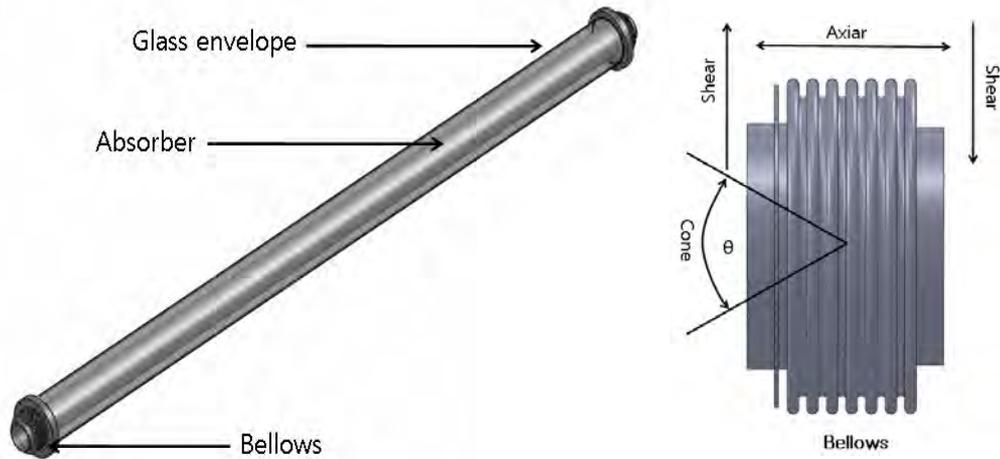
<그림 2-4> PTC형 태양열집열기 설계도면.

<표 2-2> PTC형 태양열집열기의 주요치수

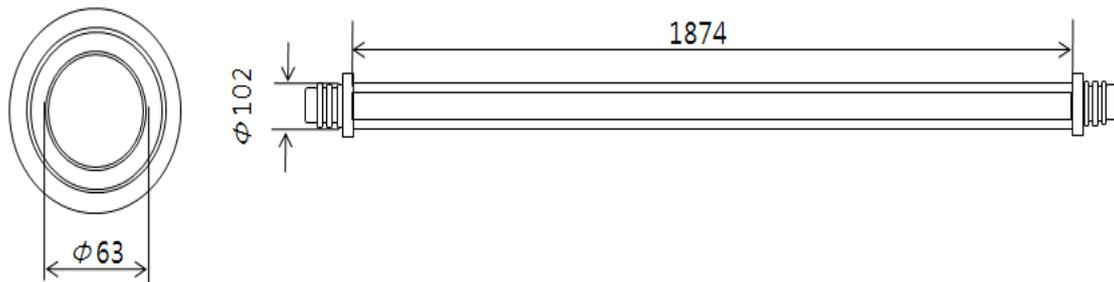
Description	Dimension
Focal distance (f)	782 mm
Rim angle ( $\phi_r$ )	73°
Parabola aperture	2,300 mm
Parabola length	1,868 mm
Parabola area	4.2964 m <sup>2</sup>
Parabola height	422.8mm
Arc length (S)	2,450.4 mm
Concentration ratio	11.62

## 2. 흡수관

본 연구에 사용된 흡수관(SEIDO6, Beijing Sunda Solar Energy Technology Co., Ltd., China)은 표면을 보호하고 공기로의 대류열손실을 줄이기 위해 내부가 진공 처리된 원통형의 봉규산업 유리로 만들어진 진공 유리관으로 직경 100 mm이고, 길이 2,000 mm이며, 내부에 직경 63mm, 길이 1900mm의 스테인리스 관이 설치되어 있다(그림 2-5, 그림 2-6). 진공 유리관 내부의 스테인리스 관 외 표면은 흡수율이 0.92 이상인 알루미늄 질화물 선택 코팅처리가 되어 있어, 태양 복사열이 관 내부로 순환하는 열매체에 최대한 흡수할 수 있는 구조로 되어 있다.



<그림 2-5> PTC 태양열집열기에 설비된 흡수관 구조.



<그림 2-6> PTC 태양열집열기에 설비된 흡수관 설계도면.

진공 유리관 내 알루미늄관의 양끝은 벨로즈(bellows)로 되어 있어 열팽창 시 이완이 가능하여 유리관 내에 진공 환경을 유지하면서 진공유리관의 파손을 방지함과 함께 양 방향으로 힘을 분산시키는 작용을 하도록 한다. 진공유리관 외부 표면에는 진공을 위한 공기 흡입구가 설비되어 있다. 흡수관의 길이는 1,874 mm이고 유리관 외경은 102 mm이며, 선택적 흡수막 처리된 내부 알루미늄 관의 직경은 63 mm이다.

### 3. 태양추적 장치 설계 및 제작

#### 가. 태양 추적시스템의 용도

태양광 발전 시스템이나 태양열 집열 시스템에 있어 태양광은 항상 태양 전지판이나 집열기의 반사판에 수직으로 입사해야 효율을 극대화 할 수 있다. 특히 집광형 태양열 집열 시스템의 PTC(Parabolic Trough Concentrator)방식이나 접시형 집열기의 경우 태양을 추적하여 수직으로 정확히 입사되지 않으면 초점이 흡수관을 벗어나 효율이 현저하게 줄어드는 문제점이 발생한다. 특히, 우리나라와 같이 계절에 따라 기후 변화가 크고, 태양 고도 폭이 크게 변하는 경우에는 고정식이 아닌 추적식 집광 방식을 선택해야만 초기 투자비 상환기간을 단축시키고 에너지 생산 단가를 낮출 수 있다.

현재 태양추적 방식에는 광학적 방식과 천문학적 방식이 주로 사용되어지고 있다. 광학적 방식은 추적 장치에 광센서를 달고 이를 비교하여 빛이 많은 쪽, 또는 적은 쪽으로 추적장치가 움직이도록 하는 방식이다. 천문학적 추적방식은 시스템 설치지역의 위도와 경도를 시간에 따라 계산하여 태양과 최적의 각(90도)을 항상 이루도록 하는 방법이다.

광학적 방식의 추적기는 센서에 의해 움직이므로 흐린 날이나 태양이 구름에 가려진 경우 정확한 태양추적이 되지 않는 단점이 있으며, 그 점을 보완하기위해 천문학적 계산에 의해 정확한 위치를 추적하는 방식을 사용할 수 있다. 천문학적 방법에 의해 태양의 위치를 찾아가므로 장시간 동안 태양이 나타나지 않은 경우도 태양추적이 가능하고, 이물질에 의한 오동작을 일정범위 내에서 제한할 수 있으며, 프로그램이 비교적 간단하면서도 정확한 태양의 위치 추적이 가능하여 오류도 적어지는 장점이 있다. 하지만 이 방법에 의한 추적방식 또한 몇 가지 문제점을 지니고 있다. 강한 바람에 의하여 작동모터의 백래쉬(backlash)가 발생하고 이로 인하여 초기 위치가 변경되면 추적 오차가 크게 발생할 수 있다는 점이다. 이처럼 각각의 방식에 장단점이 있어 요즘은 2가지 방식을 병행하여 좀더 정확한 추적을 할 수 있는 기술들이 개발되고 있다.

추적의 방향에 따른 구분은 1축 추적과 2축 추적으로 나누어지며 1축 추적의 경우 태양광의 방위각에 따라 동쪽 방향에서 서쪽 방향으로 추적하여 약 20%정도 효율을 높일 수 있으며, 2축 추적의 경우 1축 추적 방식에 태양 고도 변화에 따라 남에서 북으로도 함께 추적하여 약 50% 정도 효율을 향상시킬 수 있다.

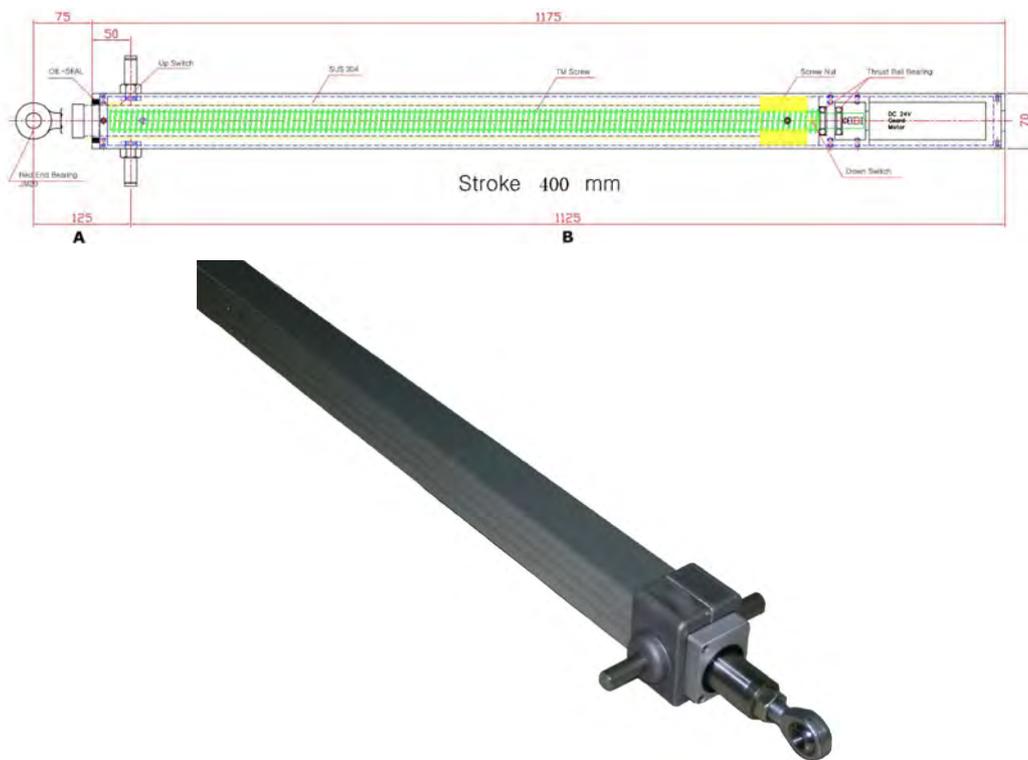
#### 나. 태양추적 시스템의 구성

본 연구에서 태양을 추적하기 위한 기본 시스템은 태양 고도각 추적을 위해 Linear Actuator를 사용하였으며, 방위각 추적은 Slew Drive를 사용하였다. 각 축의

DC모터 제어는 광센서식인 2-축 태양추적센서(Heliostat Dual Axis Solar Tracking Sensor, HELIOTRACK, USA)의 신호에 의해 작동되며, TRK-200이라는 모션테크놀로지 제품의 컨트롤러를 사용하였다. 태양추적 시스템의 각 구성 부품의 작동특성은 다음과 같다.

(1) 태양 고도각(Elevation) 추적을 위한 Linear Actuator

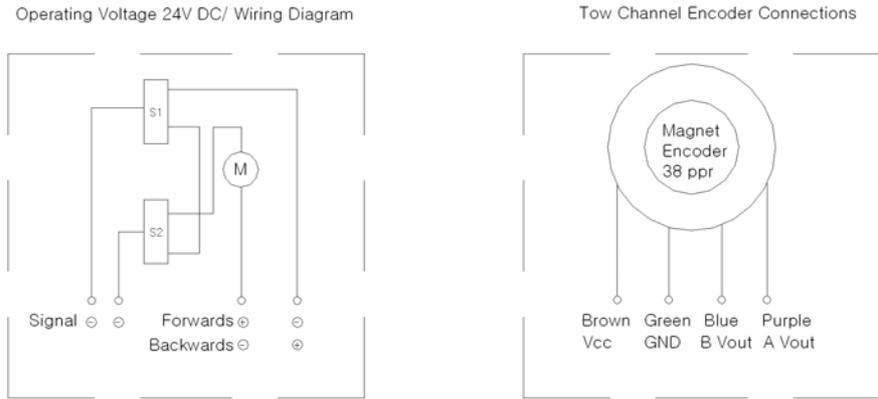
Linear Actuator의 로드(그림 2-7)는 SUS 304 재질을 사용하였고 하우징은 산화 처리한 알루미늄을 사용하여 자중 및 바람의 영향을 고려하여 정적하중 50,000N, 동적하중 20,000N까지 견딜 수 있도록 제작하였으며, 38ppr 2채널의 자기식 엔코더를 사용하여 정밀한 위치를 제어 할 수 있도록 하였다. 또한, 모터 1회전에 약 0.017 mm 이동하며 무부하시 1.169 mm/sec의 속도로, 부하가 작용 할 때는 0.7 mm/sec의 속도로 동작하고 스크류 너트의 이동 범위의 양 끝에 리미트 스위치를 설치하여 동작 범위를 0~90도로 제한하여 안전을 확보하였다. 표 2-3에 Linear Actuator의 기본 사항을 나타내었으며, 배선도는 그림 2-8에 나타내었다.



<그림 2-7> Linear Actuator의 기본 구조.

<표 2-3> Linear Actuator의 상세 사양

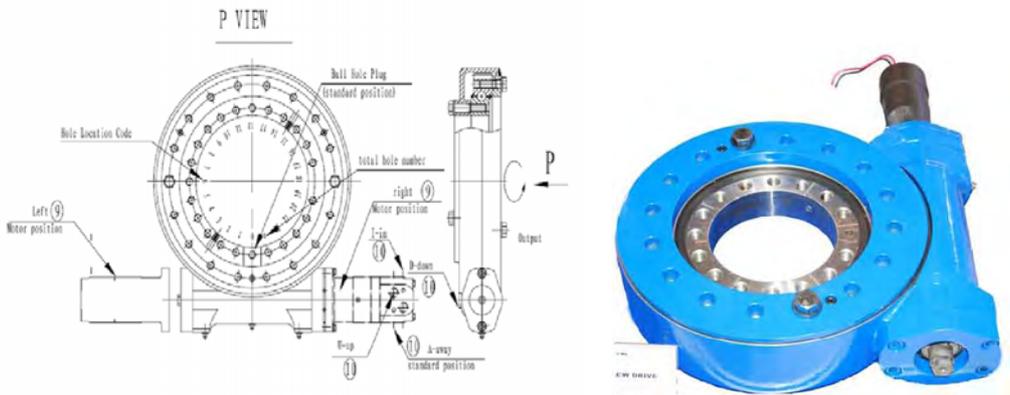
Dynamic load (N)	Static load (N)	Speed (mm/sec)	Motor revolution per Stroke (R/mm)	Current (A)	Input voltage
20,000N	50,000N	1.169/0.7 (load)	1R/0.017mm	0.7/5(Max)	24vdc



<그림 2-8> Linear Actuator의 배선도.

(2) 태양 방위각(Azimuth) 추적을 위한 Slew Drive

동에서 서로 태양을 추적하기 위해 사용한 Slew Drive는 DC 모터에 73:1의 감속비를 갖는 웜 기어를 장착한 구조로 모터의 최대 토크는 58.86N-m, Slewing 토크는 1,278N-m로 동작하며 축 하중 6,804kg까지 견딜 수 있도록 하여 외부의 영향에도 안정적으로 동작 할 수 있도록 제작하였다. 또한, 웜 기어 방식을 선택함으로써 외부 영향에 의한 역 토크가 모터에 전달되지 않도록 하고, 기어의 정밀도를 높여 백래쉬를 최소화 하였으며, 정북 방향 위치에 리미트 스위치를 부착하고 270도 회전된 위치에 리미트 스위치를 부착하여 기준 위치와 동작범위를 설정하였다. 그림 (2-9) 및 (2-10)은 Slew Drive의 기본 구조 및 상세도면을 나타내고 있다.

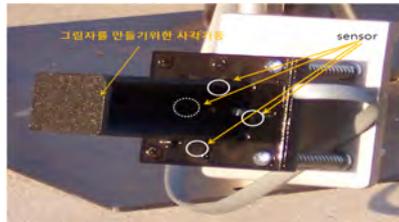


<그림 2-9> Slew Drive의 기본 구조.



### (3) 태양추적센서

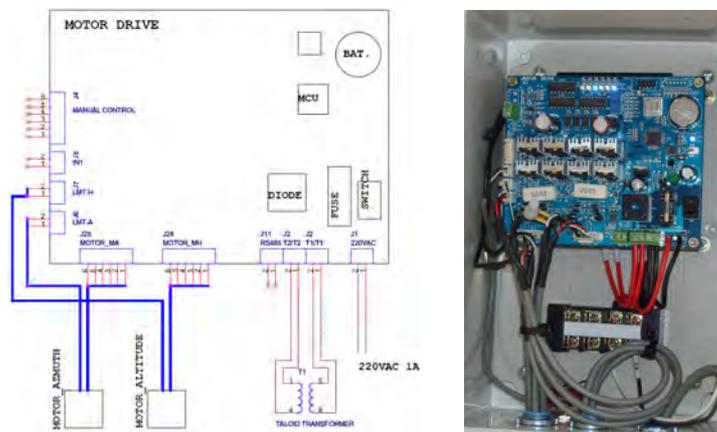
본 연구에서 사용된 2-축 태양추적센서의 태양추적 원리는 가장 밝은 위치의 태양광을 추적하고 구름에 태양이 가리면 작동을 멈춘 후 태양이 나타나면 즉시 추적할 수 있고 야간에는 원위치로 복귀한다. 2-축 태양추적장치의 특징은 3개의 전압 비교회로를 응용한 입력회로와 2개의 반도체 H-Bridge형 출력 드라이브로 간단히 구성 되어있다(그림 2-11). 입력 1과 2는 창문형 회로와 함께 양방향 컨트롤 기능을 적용하였으며, 3번 입력 비교회로는 양방향의 방향설정을 판정하기 위한 회로이다. 또한, 3번 입력회로는 기타 컨트롤을 하기 위한 용도로 활용될 수 있도록 제작되어 있다.



<그림 2-11> 2-축 태양추적 센서.

### (4) 제어장치

제어기는 220VAC를 DC로 변환하기 위한 전원부와 8비트 고속 MCU, 32KB Flash 메모리, 2KB RAM, Real Time Clock 등으로 구성된 제어부, 액추에이터의 리미트 스위치 입력, 수동 조작기 연결, 안전모드 스위치 연결 등을 위한 입력부 그리고 모터 제어 출력과 작동상태 표시 LED 등으로 구성된 출력부를 갖추고 있으며 RS-485 통신 기능을 갖추고 있어 원격에서 컴퓨터로 제어 할 수 있도록 구성하였다(그림 2-12).



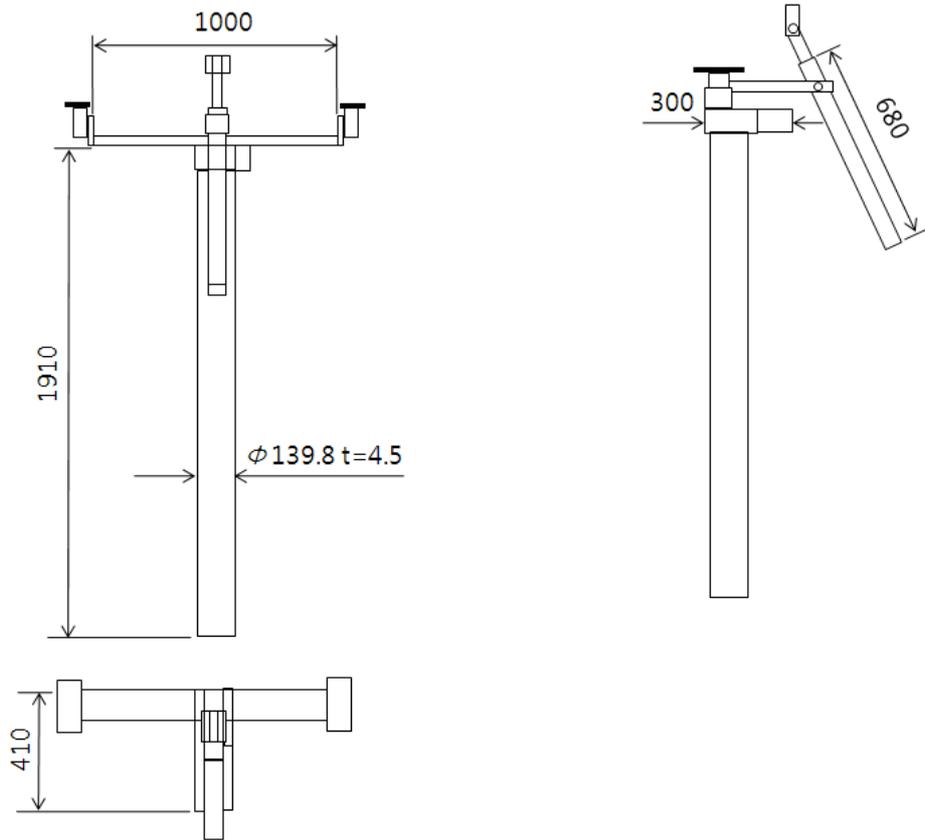
<그림 2-12> 태양추적 제어장치 회로도 및 실물사진.

#### 다. 태양추적장치 설비

태양 고도(Altitude) 추적을 위한 Linear Actuator와 태양 방위각(Azimuth) 추적을 위한 Slew Drive를 이용하여 태양추적장치를 제작하였다(그림 2-13). 본 연구에서 사용된 태양추적장치의 Linear Actuator와 Slew Drive는 2-축 태양추적센서(Heliostat Dual Axis Solar Tracking Sensor, HELIOTRACK, USA)의 신호에 의해 작동하는 광센서식이며, 구동 방식으로는 양축형 추적 장치로 Azimuth controller와 Altitude controller로 구동이 된다. Altitude controller는 DC모터를 사용한 전동 실린더를 이용하여 고도를 조절하고, Azimuth controller는 DC모터를 사용해 방위를 조절하게 되어있다. 태양추적장치의 주요 구성품 조립도면은 그림 2-14와 같으며, 태양추적 장치는 하단이 콘크리트로 고정된 외경 139.8 mm, 두께 4.5 mm, 높이 1,910 mm의 스테인리스 관 지지대위에 설치되었다(그림 2-15).



<그림 2-13> 태양추적장치의 주요 구성부분.



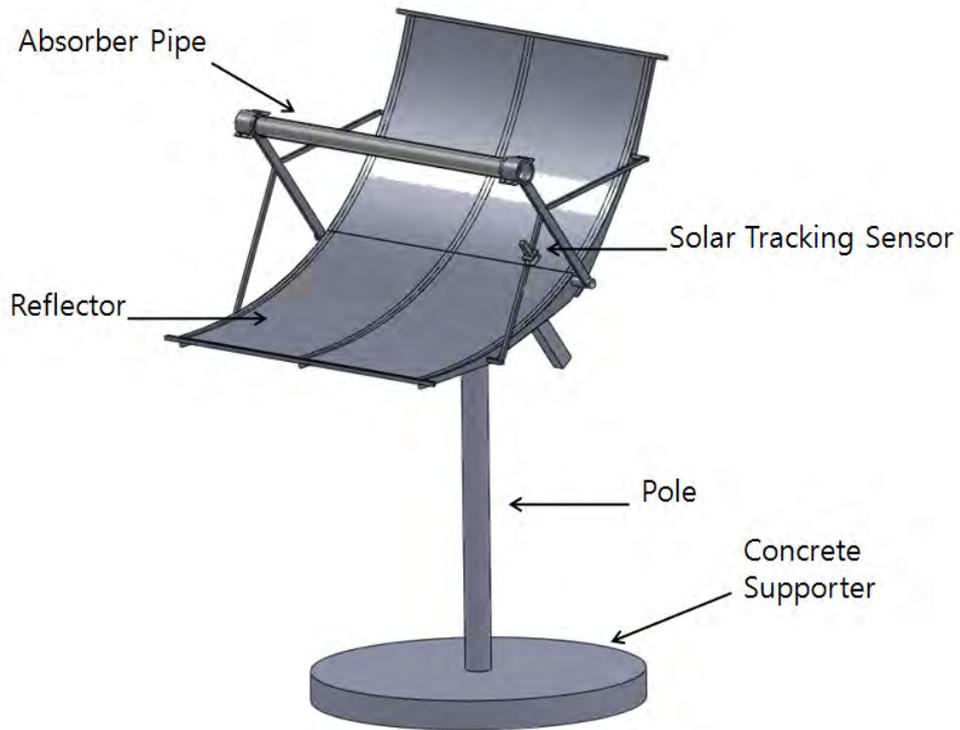
<그림 2-14> 태양추적장치 주요 구성품의 조립도면.



<그림 2-15> 태양추적장치의 주요 구성성분.

#### 4. 태양추적 PTC형 태양열집열기

제작된 PTC형 태양열집열기는 콘크리트 지지대의 스테인리스 관 기둥 위에 설비된 태양추적장치와 조립되었으며, 본 연구에서 설비된 2축 태양추적 PTC형 태양열집열기는 그림 2-16과 같다.



<그림 2-16> 태양추적 PTC형 태양열집열기.

## 5. 축열조

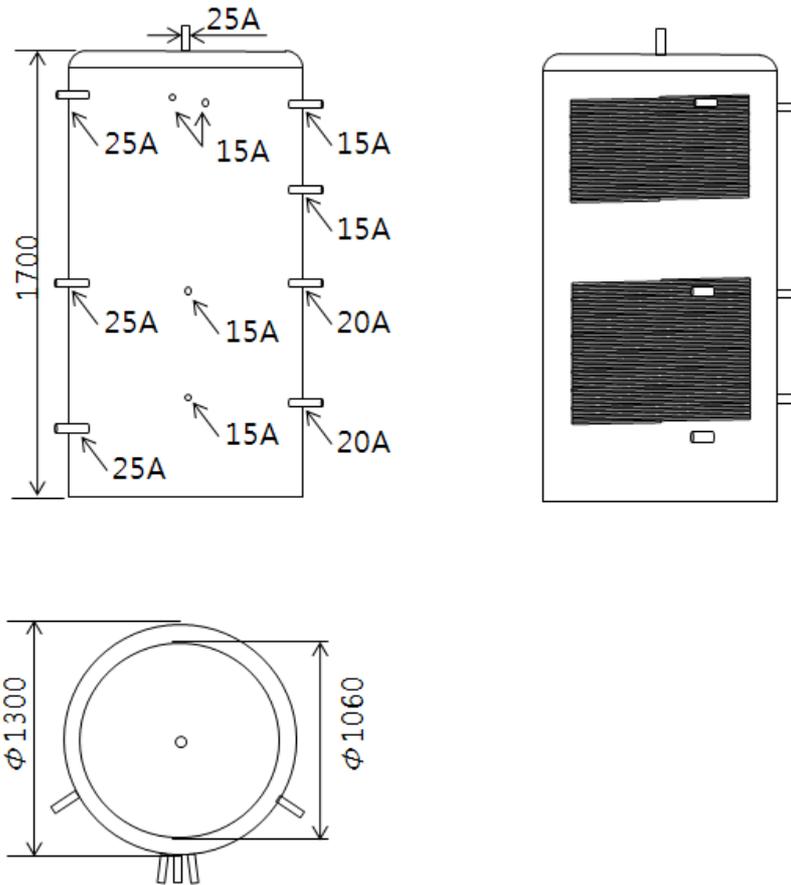
### 가. 축열조 설계 및 제작

본 실험에 사용된 축열조는 1500 ℓ의 용량이며, 직경 1,060 mm 및 높이 1700 mm의 내통은 스테인리스강(STS316L)으로 제작되었고, 내통의 외부는 120 mm 두께의 폴리우레탄폼으로 단열되어 있으며, 외부 케이스는 칼라강판으로 제작되었다(그림 2-17, 그림 2-18). 축열조의 배관 및 온도센서 삽입을 위한 연결부들은 총 12개이며, 각각 태양열 건조장치의 열교환기 순환을 위한 온수 입출구용 2개, 축열조 내 열교환기 순환을 위한 열매체 입출구용 2개, 예비의 온수이용에 사용하기 위한 축열조 내 열교환기 순환을 위한 온수 입출구용 2개, 축열조 내 물의 온도계측을 위한 온도센서용 3개, 축열조 내 물의 수위감지를 위한 저수위 센서용 1개 및 축열조 내 물 공급을 위한 급수조용 1개로 구성되어 있다.

축열조 내 물의 온도계측을 위해 축열조 내 상, 중, 하의 온도센서용 출입구(15A Steel Socket)에 3개의 온도센(PT100Ω)를 각각 설치하였다. 각 좌측 상단과 하단에 위치한 건조기용 온수 입출구(25A Steel Socket)는 PTC 태양열집열 시스템에 의해 축열된 물이 연구 2차 년도에 개발될 태양열 건조장치 내 열교환기를 순환하면서 건조장치의 열원으로 이용하기 위한 온수 입출구이다. 또한 상단에 위치한 열교환기 예비용 온수 출입구(15A Steel Socket)는 상부 열교환 코일과 연결되어 진고, 축열조 하단에 위치한 열매체 입출구(20A Steel Socket)는 축열조 내 열교환 하부코일과 연결되어 진다. 축열조 상단에 위치한 저수위 센서용 연결부(15A Steel Socket)는 센서를 장착하여 축열조 내부의 수위를 측정하기 위해 제작되었다. 또한 축열조 최상부에 위치한 급수조 연결부(25A Steel Socket)는 축열조 내에 적정한 물 공급을 위해 플로트가 설비된 급수조와 연결하기 위한 것이다.



<그림 2-17> PTC 태양열 집열시스템의 축열조 구조.



<그림 2-18> PTC 태양열 집열시스템의 축열조 설계도면.

#### 나. 열교환기

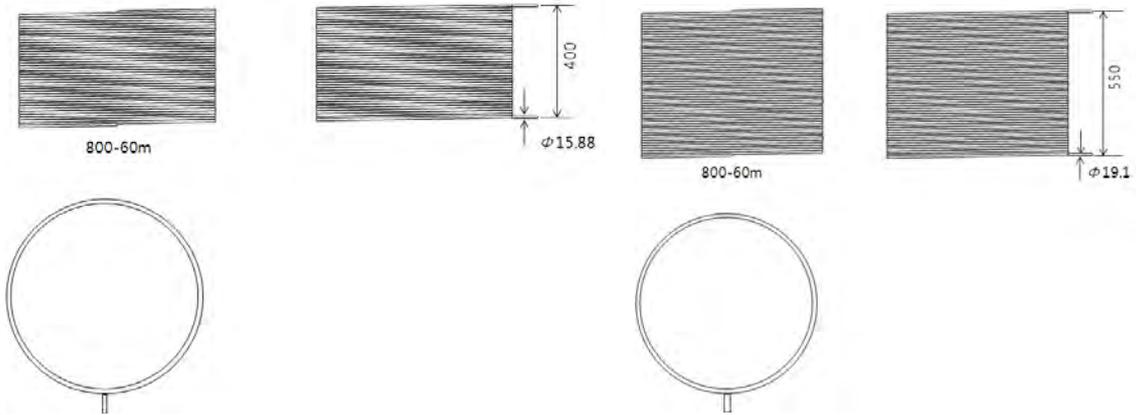
축열조 내에는 상부와 하부에 2개의 코일형 열교환기가 설치되어 있다(그림 2-19, 그림 2-20). 상부의 코일형 열교환기는 냉수를 열교환기 내로 순환시켜 축열조 내의 가열된 물과 열교환에 의해 온수를 생산하여 이용할 수 있게 한 부가적인 장치이다. 또한 하부의 코일형 열교환기는 PTC 태양열집열기의 흡수관으로부터 가열된 열매체(물 70%, 에틸렌글리콜 30%)를 축열조 내 열교환기로 순환시켜 축열조 내에 저장된 물을 가열하고 냉각된 열매체는 다시 PTC 태양열집열기의 흡수관을 순환하면서 태양복사열을 집열하여 축열조 내 물을 가열하여 축열하는 역할을 한다. 상부와 하부의 코일형 열교환기는 스테인리스관으로 제작된 동일한 형태이다. 상부 코일형 열교환기의 크기는 스테인리스관의 직경이 15.88 mm이고, 스테인리스관의 전체 길이는 60 m이며, 스테인리스 관은 800 mm의 직경을 갖는 원형으로 높이 400 mm로 감겨져 있는 코일 형태이다. 또한 하부 열교환기는 스테인리스관의 직경이 19.10 mm, 스테인리스관의 전체 길이는 60 m이며, 스테인리스관은 800 mm의 직경을 갖는 원형으로 높이 550 mm로 감겨있는 코일 형태이다.



(a) 상부 코일형 열교환기

(b) 하부 코일형 열교환기

<그림 2-19> 축열조 내 열교환기의 구조.



(a) 상부코일

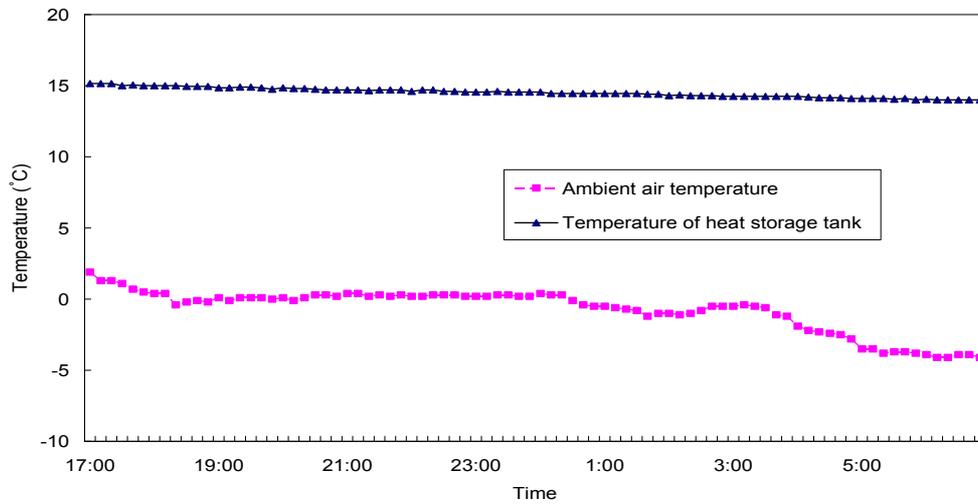
(b) 하부코일

<그림 2-20> 축열조 내 열교환기의 설계도면.

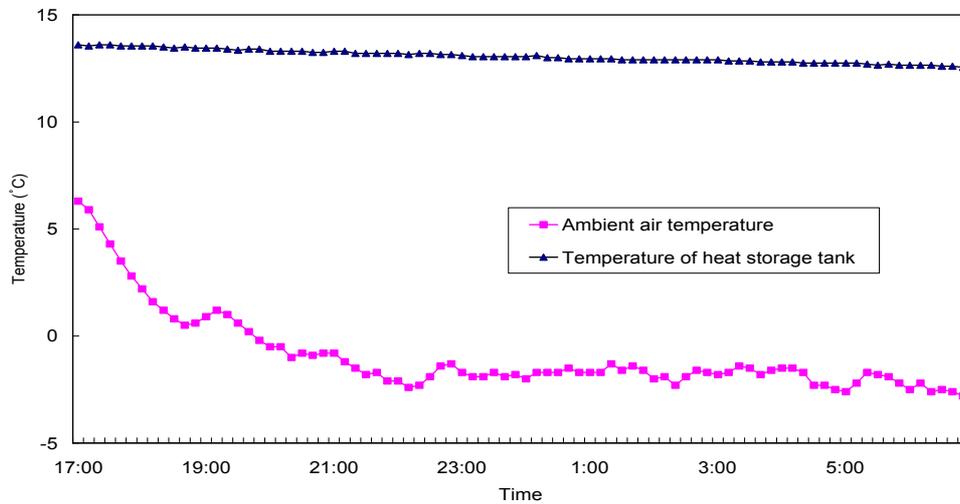
#### 다. 축열조 성능 분석

축열조의 단열성능 분석을 위해 1,500 ℓ 용량의 축열조 내에 물을 가득 채운 후 14시간 동안 외기 온도변화에 따른 축열조 내 물의 온도변화를 동절기 동안 2회에 걸쳐 분석하였다. 축열조 내 물의 온도측정을 위해 축열조 상(PT01), 중(PT02), 하(PT03)의 3곳에 설치된 온도센서(PT100Ω) 및 외기온도 측정을 위해 지상 1 m 지점의 그늘진 곳에 설치된 열전대(thermocouple T type)를 Data Logger(GL800, GEAPHTEC, USA)에 연결하여 온도를 10분 간격으로 실시간 계측하였다. 축열조 내 물의 온도는 축열조 내 3지점의 물의 온도를 평균하여 분석에 사용하였다.

그림 2-21에 나타난 것과 같이 대기온도는 오후 8시 이후에 대체로 0℃이하로 내려간 상태이나, 축열조 내 물의 온도는 실험 14시간 동안 단지 약 1℃ 정도만 내려간 상태로 축열조의 단열성능이 매우 우수함을 나타내었다. 즉 본 연구에서 제작된 축열조는 축열조로 부터의 열손실이 축열식 전기보일러의 시험기준(13시간 내에 400 ℓ 용량은 10℃, 900 ℓ 용량은 9℃, 2,700 ℓ의 용량은 8℃ 이내의 온도변화가 시험기준 임) 보다 훨씬 적은 양임을 알 수 있다.



(a) 1차 실험



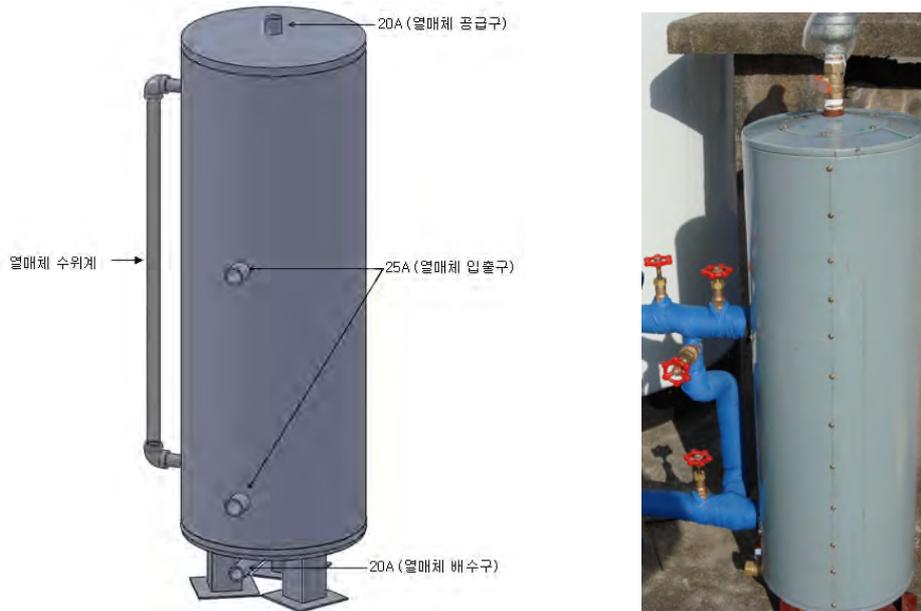
(b) 2차 실험

<그림 2-21> 축열조 내 물의 온도변화.

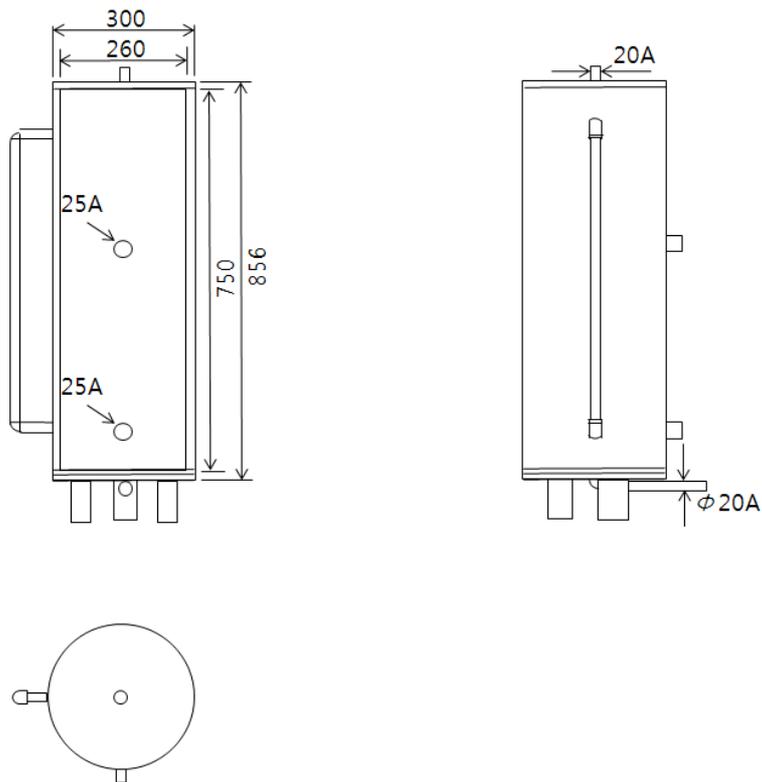
## 6. 열매체 보충탱크 설계 및 제작

열매체 보충탱크는 내통의 지름이 260 mm이고, 높이는 750 mm인 40ℓ의 용량을 갖는 스테인리스강(STS316L)으로 제작되었다(그림 2-22, 그림 2-23). 보충탱크 내통의 외부는 20 mm 두께의 폴리우레탄폼으로 단열되어 있으며, 외부 케이스는 칼라강판으로 제작되었다. 보충탱크 상부에는 열매체 주입을 위한 공급구가 설치되어 있고, 탱크 중간 및 하단에 위치한 열매체 입구와 출구를 사용하여 PTC 태양열 집열기의 흡수관 및 축열조 내 하부 열교환기를 순환하는 열매체를 처음 가동 시 채워주거나, 필요에 따라 보충해 주는 역할을 하며, 또한 열매체 순환 유로 내에 열매체의 압력이 상승할 경우 이를 완화시켜주는 역할을 한다. 열매체 보충탱크 하단

에는 필요시 탱크내의 열매체를 배출하기 위한 배수구가 설치되어 있다. 또한 열매체 보충탱크의 외부에는 투명 PC관으로 된 열매체 수위계를 설비하여 보충탱크 내 열매체의 수위를 나타내도록 하였다.



<그림 2-22> 열매체 보충탱크의 구조.



<그림 2-23> 열매체 보충탱크의 설계도면.

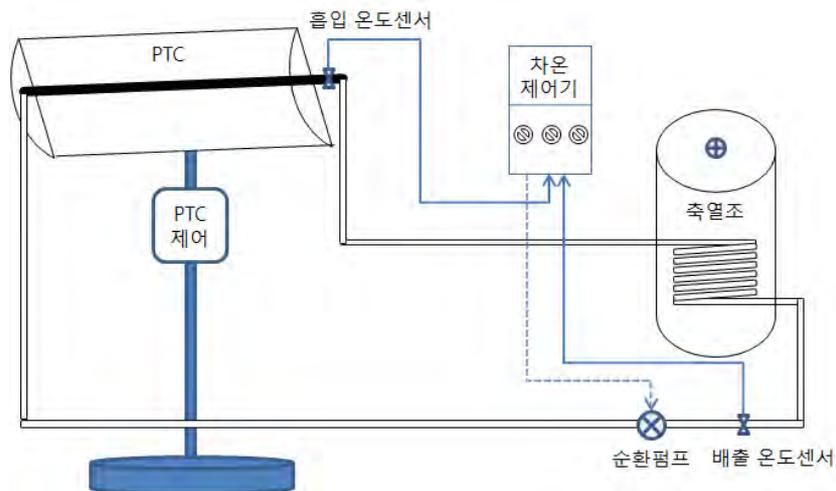
## 7. 차온 제어장치 설비

### 가. 차온 제어장치의 필요성

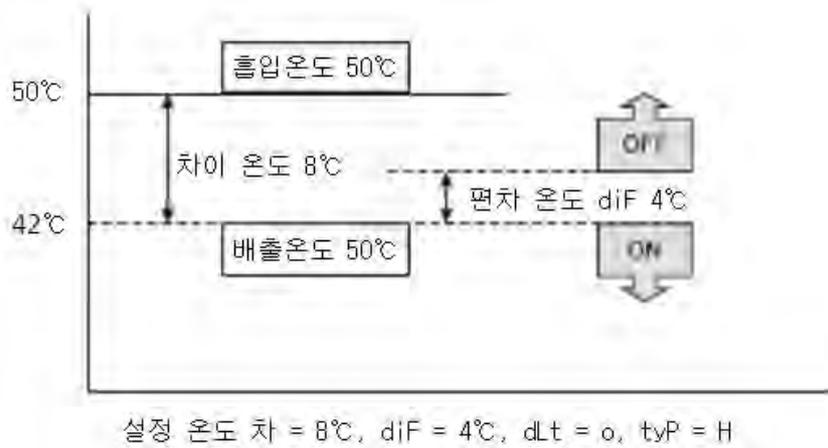
태양열 집열 시스템을 제작함에 있어 효율을 높이기 위해서는 각 부분에서 발생하는 열손실을 최대한 줄여야 한다. 열손실이 발생하는 수많은 요소들 중 순환펌프의 불필요한 동작에 따른 전력 손실과 열매체 순환에 따른 축열조의 열에너지가 역으로 외부로 전달되어 손실을 가져오게 되는 것이 주요 원인 중에 하나다. 따라서 흡수관에서 획득되는 태양열 에너지가 순환펌프 동작 에너지와 관로에서의 열손실 합 보다 적을 경우에는 순환펌프의 동작을 제한하는 방법이 반드시 필요하다.

### 나. 차온 제어장치의 시스템 구성

본 시스템은 (주)삼원이엔지의 SU-1133D라는 자동 온도조절 제어기에 2개의 온도센서를 부착하여 온도차를 검출하고 MC(마그네틱 커넥터)의 릴레이 접점을 이용하여 순환펌프 동작을 제어 할 수 있도록 구성되어 있다(그림 2-24). 기본적인 연결은 흡입 온도 센서는 흡수관의 출력 부분에 설치하고 배출온도 센서는 축열조에서 열교환이 이루어진 다음 순환펌프로 연결되는 부분에 설치하여 태양열에 의한 집열 온도와 축열조에서 열 교환이 이루어진 후의 온도를 비교하여 8℃이상 차이가 나면 순환펌프와 연결 된 릴레이를 동작시켜 열매체를 순환시키고 흐리거나 저녁 시간이 되어 집열 효율이 떨어져 온도차가 4℃이하로 줄어들면 순환펌프의 동작을 멈추도록 구성하였다(그림 2-25).



<그림 2-24> 차온 제어장치 구성도.



<그림 2-25> 차온 제어장치의 동작 다이어그램.

또한, 흡입과 배출 온도의 변화 속도가 빠르지 않음으로 지연 타이머 설정은 0초로 하였으며, 제어 타입(tyP)값은 'H' 타입으로 설정하여 온도차가 설정값 이상이 될 때 릴레이 동작이 ON 되도록 설정하여 운영하였다.

동작 온도는 실험을 한 시기가 겨울이라 8°C에서 4°C 범위에서 ON/OFF 동작을 반복하도록 설정하였지만 외기 온도가 올라가면 동작 온도 범위를 더 좁혀야 할 것으로 판단되며, 정확한 온도 설정은 외기온도에 따른 관로의 열손실과 순환펌프 동작에 따른 손실을 측정하고 흡수관의 획득에너지와 비교하여 최적의 설정온도를 찾아야 할 것이다. 그림 2-26은 PTC형 태양열 집열 시스템에 설비된 차온 제어장치의 실물을 타나내고 있다.



<그림 2-26> PTC 태양열 집열 시스템의 차온 제어장치 실제 사진.

## 8. PTC 태양열 집열시스템 작동방법 및 자료획득 장치구성

### 가. 열매체 보충

PTC 태양열 집열시스템의 계통도 및 실제 설비사진을 그림 2-27 및 그림 2-28에 나타내었다. 흡수관 및 축열조 내 하부 열교환기를 순환하는 열매체를 채우거나 보충하기 위해 열매체 보충펌프를 가동한다. 또한 열매체 보충펌프 가동과 함께 PTC 태양열 집열시스템에 있어 밸브는 표 2-4와 같은 상태를 유지해야 한다. 표 5-4와 같이 밸브의 상태를 유지하면서 열매체 보충펌프를 가동하면 열매체 보충탱크 하단에 있는 관을 통해 열매체가 열매체 보충펌프를 통해 밸브 1번, 6번, 7번, 8번, 9번 4번, 2번을 걸쳐 각 배관, 흡수관 및 축열조 내 하부의 코일형 열교환기 내에 열매체가 채워지고, 관 내부에 차여 있는 공기는 열매체 보충 탱크의 상단으로 밀려들어와 제거된다.

<표 2-4> 열매체 보충을 위한 밸브 상태

Valve number	Valve state
1	Open
2	Open
3	Close
4	Open
5	Close
6	Open
7	Open
8	Open
9	Open

### 나. 축열조 급수

축열조 내에 물을 채우기 위해 급수조에 물을 채우면 자체 압력으로 인해 물이 관을 통해 축열조 하단에 있는 밸브를 통해 축열조 내에 물이 차게 된다. 또한 급수조에 물이 넘치는 것을 방지하기 위하여 급수조 내에 플로트를 설치하였다.

### 다. PTC 태양열 집열시스템 가동

PTC 태양열 집열시스템 가동 시 열매체 순환펌프를 작동시키고 밸브의 상태는 아래 표 2-5와 같게 한다. 본 연구에서 PTC 태양열 집열 시스템은 차온제어 시스템을 갖추고 있어 축열조 내 물의 온도와 집열관 출구의 열매체 온도를 온도센서(IC type, IC 01, IC 02)에 의해 자동 계측하여 온도차가 8°C이상이 되면 열매체 순환펌프는 작동하고, 온도차가 4°C이하로 떨어지게 되면 열매체 순환 펌프의 가동이 멈추도록 설비되어 있다.

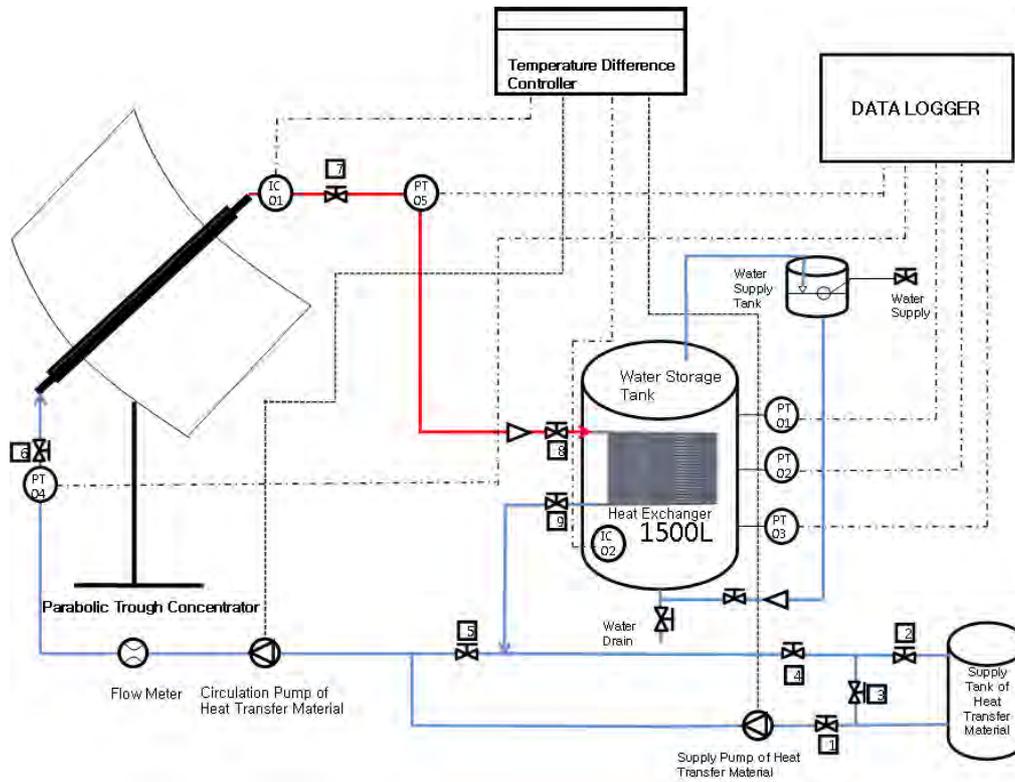
열매체 순환펌프 가동 시 열매체는 밸브 5번과 6번, 7번, 8번, 9번을 지나 다시 5번 밸브로 순환하며, 열매체의 열팽창에 의해 배관 내에 압력이 높아지면 열매체는 밸브 4번과 3번을 지나 열매체 보충 탱크로 bypass되어 관내의 압력이 해소된다. 또한 축열조 내 물의 열팽창에 의한 압력은 축열조 상단과 급수통 상단에 연결된 배관을 통해 물이 급수조로 밀어 올려져 압력을 해소 시킨다.

<표 2-5> PTC 태양열 집열시스템 가동 시 밸브의 상태

Valve number	Valve state
1	Open
2	Close
3	Open
4	Open
5	Open
6	Open
7	Open
8	Open
9	Open

라. 자료 수집장치 구성

그림 2-27 및 그림 2-28과 같이 PTC형 태양열 집열시스템은 집열기, 축열조, 열매체 보충탱크, 배관 및 데이터 수집장치로 구성 되어있다. 축열조에는 물이 채워지고, 태양열에 의해 집열기의 흡수관에서 가열된 열매체는 축열조 내의 열교환기를 순환하면서 축열조 내의 물을 가열한 후 축열조를 빠져나와 밸브, 펌프, 유량계를 지나 다시 집열기의 흡수관으로 순환 된다. 축열조 내 물의 축열온도 계측을 위해 축열조 상(PT01), 중(PT02), 하(PT03)의 3곳에 온도센서(PT100Ω)를 설치하였고, 흡수관 내 입출구 열매체 온도를 측정하기 위해 흡수관으로 연결되는 배관 내의 입구(PT04) 및 출구(PT 05)에 2개의 온도센서(PT100Ω)를 설치하였으며, 외기온도 측정을 위해 열전대(thermocouple T type)를 지상 1 m 지점의 그늘진 곳에 설치하였다. 각 온도센서는 Data Logger(GL800, GEAPHTEC, USA)에 연결하여 온도를 10분 간격으로 실시간 계측하였다. 일사량을 측정을 위해 일사량 센서(EQ08, Middleton solar, Australia)를 그늘이 없는 곳에 설치한 후 Data Logger(KL200, MRM System, Korea)에 연결하여 일사량 데이터를 10분 간격으로 실시간 수집 하였다.



<그림 2-27> PTC형 태양열 집열시스템 계통도.



<그림 2-28> PTC 태양열 집열시스템 설비사진.

## 9. 실증 실험용 PTC형 태양열 집열 시스템 성능분석

### 가. PTC형 태양열 집열기 집열성능 분석

#### (1) 실험방법

본 실험에서 태양열집열기의 흡수관과 축열조 내의 열교환기를 순환하는 열매체로 물을 사용하였으며, 축열조 내에 물을 1 ton 채우고 실험을 수행하였다. 제작된 PTC형 태양열 집열기의 일일 열성능 분석을 위해 열매체의 순환유량을 5.5 l/min으로 설정하여 성능실험을 수행하였다. 또한 집열기의 효율에 중요한 영향을 미치는 요소들 중에는 열매체 유입온도와 열매체 순환유량이다. 따라서 열매체의 순환유량을 5.5 l/min으로 설정하고, 열매체 유입온도를 25℃에서 60℃까지 범위에서 변화시키면서 열매체 유입온도가 집열기의 효율에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 집열관 입구의 열매체 유입온도를 약 25℃로 일정하게 유지하고 집열관 내를 흐르는 열매체 유량을 2 l/min, 4 l/min 및 6 l/min로 변경하면서 열매체 순환유량이 집열기의 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

집열효율( $\eta$ )는 PTC형 태양열집열기의 집열성능을 평가하는 기본적인 값이며, 이는 특정 시간 동안 PTC 집열기에 의해서 집열된 에너지와 똑같은 시간 동안 집열기 개구부에 입사하는 복사에너지의 비율로서 정의되며 순간효율을 나타낸다. 집열기 성능분석을 위해 흡수관의 입구와 출구의 온도 값을 비교하여 흡수관내에서 집열한 열량을 아래 식 (2-3)을 사용하여 구하였다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \text{ ----- (2-3)}$$

여기서,

$\dot{m}$  = 질량 유량(kg/s)

$C_p$  = 물의 비열(J/kg℃)

$T_o$  = 집열관 출구 열매체 온도(℃)

$T_i$  = 집열관 입구 열매체 온도(℃)

위 식 (2-3)과 측정된 일사량 자료를 사용하여 순간효율( $\eta$ )을 아래 식 (2-4)에 의해 계산 하였다.

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

여기서,

$$I = \text{직달 일사량}(W/m^2)$$

$$A = \text{PTC 면적}(m^2)$$

외기 온도와 흡수관의 온도 차에 따른 순간효율 분석을 위해 아래의 식 (2-5)를 사용 하였다.

$$\eta = (T_r - T_a) / I \text{ ----- (2-5)}$$

여기서,

$$T_r = \text{흡수관 내의 평균 온도}(^{\circ}\text{C})$$

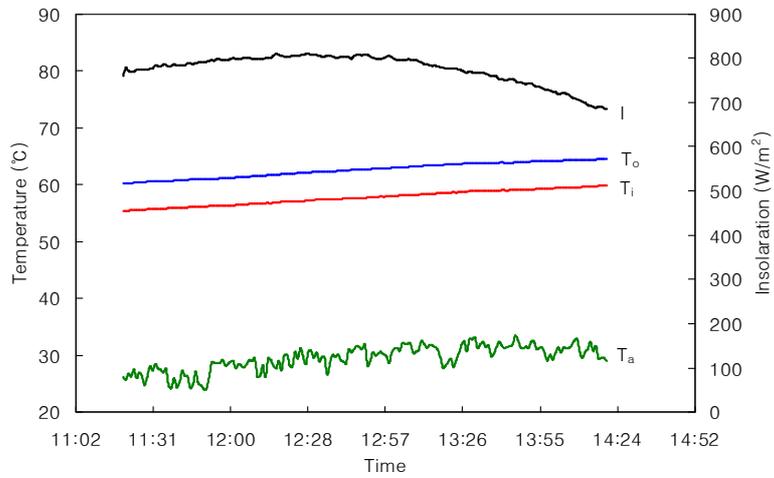
$$T_a = \text{대기 온도}(^{\circ}\text{C})$$

위 식에서  $T_r$ 는 아래 식 (2-6)을 이용하여 계산 하였다(Duffle and Beckman, 1991; Howell et. al, 1982).

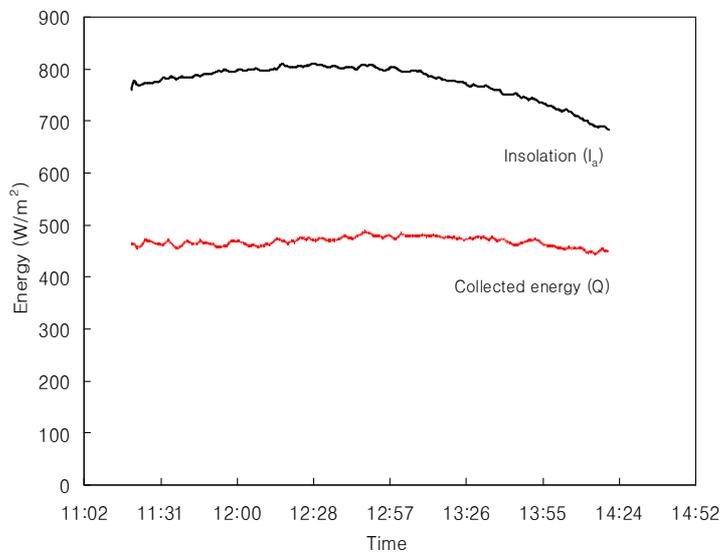
$$T_r = \frac{(T_o + T_i)}{2} \text{ ----- (2-6)}$$

## (2) 결과 및 고찰

그림 2-29 (a)는 청명한 날 11시 02분부터 14시 52분까지 산란 일사량이 비교적 적은 쾌청한 가을철에 5.5 l/min의 일정한 열매체 순환유량 하에서 일사량, 외기온도, 흡수관 입구 및 출구의 열매체 온도 변화를 나타낸 것으로 일사량의 변화에 따라 흡수관 입·출구의 열매체 온도차가 비례적으로 변하는 것을 알 수 있다. 즉 흡수관 입·출구의 열매체 온도차가 일사량이 약 800w/m<sup>2</sup>인 구간에서 5<sup>o</sup>C 정도였으며, 일사량이 700w/m<sup>2</sup>인 구간에서 4.7<sup>o</sup>C 정도로 일사량에 비례하여 다소 높은 열성능을 나타내고 있다. 또한 그림 2-29 (b)는 일사량의 변화에 따라 흡수관 내를 순환하는 열매체에 흡수되는 집열량의 변화를 나타낸 것으로, 일사량의 변화에 따라 집열기의 열성능이 민감하게 변화하여 집열기에서 획득한 열량이 일사량에 비례적으로 잘 변하고 있음을 나타내고 있다.



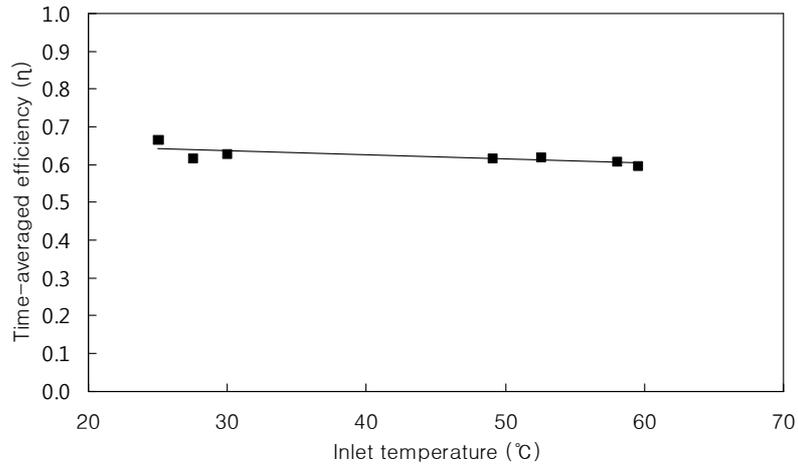
(a)



(b)

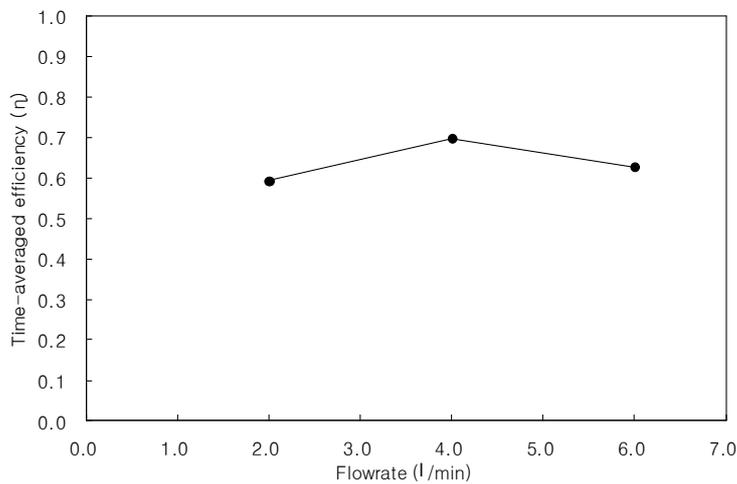
<그림 2-29> PTC형 태양열집열기의 열성능 곡선.

그림 2-30은 PTC형 태양열 집열기에 공급되는 열매체의 유입온도에 따른 시간평균 효율 값을 나타낸 것이다. 열매체 유입온도가  $25^{\circ}C$ 인 경우 집열효율이 약 65%였으나, 열매체 유입온도가  $60^{\circ}C$ 인 경우 집열효율이 약 62%로 3%정도 다소 낮아졌으나, 이러한 효율 감소는 평판형 집열기에 비해 열매체 유입온도가 상승함에 따른 효율 저하가 매우 작게 나타난 것이다. 그 이유는 평판형 집열기의 경우 열손실 면적이 평판의 집열면적 전체가 되지만 PTC형 집열기의 경우 열손실 면적이 개구부 면적에 비해서 상대적으로 작은 흡수부의 면적이 되기 때문에 열손실이 매우 작으며, 이는 집광형 집열기의 큰 특징이며 장점이라 할 수 있다(Kwak et al., 1996).



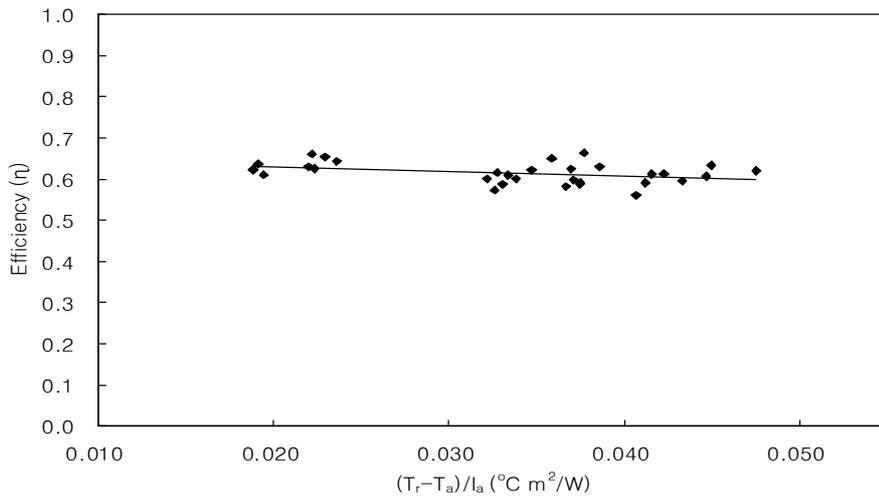
<그림 2-30> 열매체 유입온도에 따른 시간평균 집열효율.

그림 2-31은 PTC형 태양열 집열기의 흡수관에 공급되는 열매체의 유입온도를 25°C로 일정하게 한 후, 2 l/min, 4 l/min, 6 l/min의 3종류 열매체 유입유량에 따른 시간평균 효율 값을 나타낸 것이다. 최고효율 값은 4 l/min의 열매체 유입유량에서 약 70%로 나타났으며, 2 l/min의 유입유량에서 효율 값이 60%로 가장 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서 열매체의 공급유량이 2 l/min와 같이 다소 낮으면 태양 복사열을 열매체가 충분히 흡수하지 못해 효율이 낮아진 결과로 생각된다. 또한 공급유량 6 l/min에서는 효율 값이 63%로 2 l/min에 비해 다소 높은 효율을 나타냈으나, 유량이 최적 값 보다 커져 외부로의 열손실 증가로 인해 효율 값이 다소 감소한 결과로 사료된다. 따라서 본 실험에 사용된 PTC형 태양열 집열기의 최적 열매체 순환유량은 4 l/min로 분석되었다.



<그림 2-31> 열매체 유입유량에 따른 시간평균 집열효율.

그림 2-32는 일정한 열매체 공급유량 5.5 l/min 하에서 본 연구에서 제작한 PTC형 집광형 집열기의 성능을 일반적인 분석 방법인 집열효율( $\eta$ ) 대  $(T_r - T_a)/I$ 로 나타낸 것이다. 일반적으로 평판형 집열기의 효율은 열매체 유입온도가 증가하면 효율이 급격히 낮아지나(Duffle and Beckman, 1991; Howell et. al, 1982), 집광형 집열기의 경우는 열매체 유입온도가 다소 높더라도 효율 감소율이 낮아 그림 2-32와 같이 기울기의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다(Kwak et al., 1996).



<그림 2-32> PTC형 태양열집열기의 집열효율:  $\eta$  &  $(T_r - T_a)/I$ .

### (3) 요약 및 결론

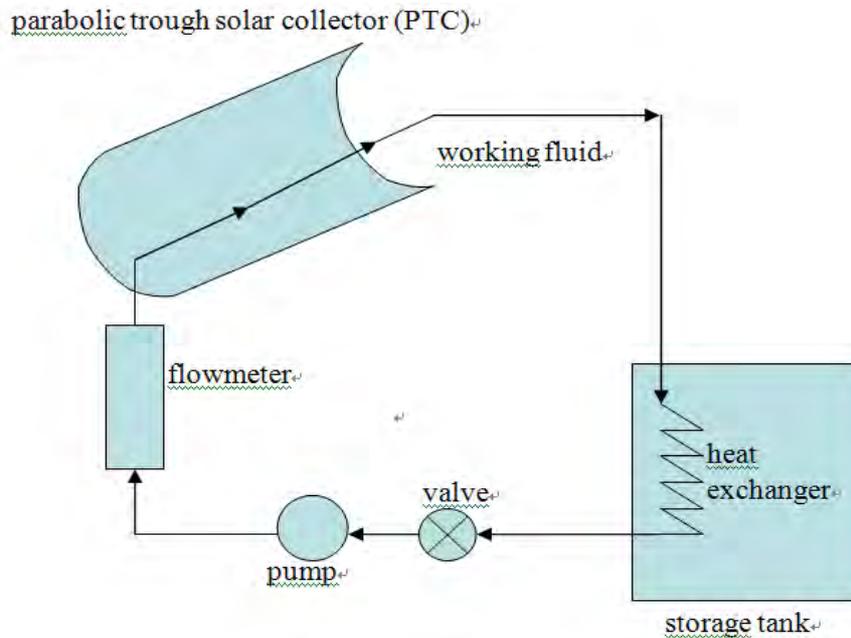
본 연구에서는 태양열의 농산업적 이용을 위해 태양 추적식 선 집광형 태양열 집열기를 제작하여 집열성능을 분석하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (가) 일사량의 변화에 따라 흡수관 입·출구의 열매체 온도차가 비례적으로 잘 변하며, 일사량의 변화에 따라 집열기의 열성능이 민감하게 변화하여 집열기에서 획득한 열량이 일사량에 비례적으로 잘 변하고 있음을 나타내었다.
- (나) 본 연구에서 제작된 PTC형 태양열 집열기의 열매체 유입온도 증가에 따른 효율 감소는 평판형 집열기에 비해 열매체 유입온도가 상승함에 따른 효율 저하가 매우 작게 나타난 것으로, 집광형 태양열집열기의 큰 특징이라 할 수 있다.
- (다) 본 연구에 사용된 PTC형 태양열 집열기의 최적 열매체 순환유량은 4 l/min로 분석되었으며, 열매체 유입온도가 다소 높더라도 효율 감소율이 낮아 집열효율( $\eta$ ) 대  $(T_r - T_a)/I$ 의 기울기의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

나. 열전달 모델 시뮬레이션

(1) 모델 정립

PTC에 흡수되는 태양 에너지와 열전달이 이루어지는 시스템의 계는 흡수관 (absorber pipe), 작동유체(working fluid), 축열조(storage tank)로 구성되며, 수학적 시뮬레이션은 그림 2-33와 같다. 집열기는 반원통 모양의 포물선 형상을 띤 반사판의 초점선 중심을 따라 흡수관이 위치한다. 흡수관의 두께 및 길이 방향의 온도 구배는 동일하고, 작동유체는 흡수관 내부를 액체 상태로 가득 채워서 흐른다고 가정한다. 작동유체의 질량유량은 항상 일정하고, 흡수관으로부터의 열전달 현상은 자연 대류이며, 태양에너지와 흡수관과의 열전달, 흡수관과 대기사이의 대류와 복사에 의한 열전달, 흡수관과 작동유체간의 대류로 인한 열전달, 저장탱크에서의 열전달 현상에 대한 에너지 평형 방정식은 다음과 같다.



<그림 2-33> PTC에 흡수되는 태양 에너지와 열전달이 이루어지는 시스템의 계.

(가) 흡수관

$$A_a k_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \tau \alpha \gamma_r I_w - \pi d_{ao} [h_w (T_a - T_o) + h_{r,sky} (T_a - T_{sky})] - \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w) = \rho_a c_a A_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (2-7)$$

여기서,

$$h_w = 2.8 + 3.0 V \text{ ----- (2-8)}$$

$$h_{rsky} = \epsilon_a \sigma (T_a^2 + T_{sky}^2) (T_a + T_{sky}) \text{ ----- (2-9)}$$

$$h_i = \frac{N \cdot k_a}{L} \text{ ----- (2-10)}$$

$$N = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ ----- (2-11)}$$

$$Re = \frac{4 \dot{m}_w}{\pi d_{ai} \mu_w} \text{ ----- (2-12)}$$

(나) 작동 유체

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \dot{m}_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \pi d_{ai} h_i (T_a - T_w) \text{ ----- (2-13)}$$

(다) 저장 탱크

$$m_s c_{pw} \frac{dT_s}{dt} = \dot{m}_w c_{pw} (T_w - T_s) - U_s A_s (T_s - T_o) \text{ ----- (2-14)}$$

(라) PTC의 열효율

PTC는 평판형 집열기에 비해 집광되는 면적에 비해 방출되는 면적이 작기 때문에 동일한 온도에서 효율향상을 기대할 수 있다. PTC의 열효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_L (T_a - T_o)}{ICR} \text{ ----- (2-15)}$$

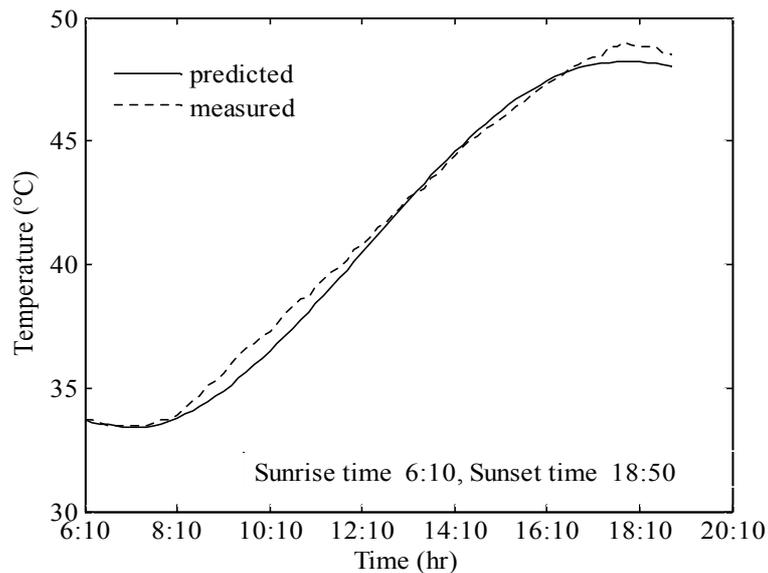
(2) 실험 방법

본 실험에 필요한 PTC는 반사판 및 흡수관, 작동유체, 저장 탱크로 구성되며, 작동유체로 에틸렌글리콜(부동액)이 사용되었다. 작동유체는 펌프에 의해 5.0 l/min으로 저장탱크 및 흡수관 내부를 순환한다. 흡수관에서 흡수되는 태양에너지는 작동유체와의 대류에 의해서 전달되며, 가열된 유체는 열교환기에 의해서 저장 탱크 내

부 물과의 열전달이 발생하며, 이와 같은 유체의 순환을 통해 저장탱크 내부의 물은 가열된다. 최대의 태양에너지를 집광하기 위한 태양추적장치 또한 설치되었다. 저장탱크 내부에 열전대를 부착하여 작동유체의 온도를 주기적으로 측정하였다. 저장탱크 내부 작동유체의 초기온도는 33.7°C이다. 실험은 2010년 9월 14일에 수행되었으며, 수집된 데이터는 Matlab v. 7.0.4 (Mathworks, Inc) 프로그램을 활용한 에너지평형 방정식을 해석하는데 사용되었다. 또한, 기상관측장비인 Weather Station (Watch Dog 2000 Series, spectrum Technologies, Inc. Plainfield, IL, USA)을 활용하여 태양복사 광도, 풍속, 대기 온도, 습도 등을 단위 시간에 따라 측정하였다.

### (3) 결과 및 고찰

실험결과는 동일한 기상 조건 및 PTC의 특성 하에서 예견된 수치를 활용하여 비교·분석되었다. 예견 및 측정된 저장탱크 내 물의 온도는 그림 2-34와 같으며, 12시간 동안 32.7°C에서 48°C까지 상승하였다. 평균 태양 복사 일사량은 539 W/m<sup>2</sup>이고, 정오에서 오후 1시 사이에는 최대 934 W/m<sup>2</sup>까지 상승하였다. 흡수관의 열효율은 55%이며, 그림 2-34를 통해 예측 및 측정된 온도가 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 표 2-6에서 보는 바와 같이 온도편차는 최대 1°C, 최소 0.1°C, 평균 0.39°C로 나타났다.



<그림 2-34> 보정 안 된 모델을 사용한 축열조 내 물의 예측 및 측정된 온도 (09/14/2010).

<표 2-6> 보정 안 된 모델을 사용한 축열조 내 물의 예측 및 측정된 온도의 편차

	Predicted(°C)	Measured(°C)	Deviation(°C)
Minimum	33.4	33.5	0.1
Maximum	48	49	1
Mean	40.89	41.28	0.39
Range	14.85	15.5	0.65

(가) 모델 보정

모델의 평가를 위해 다양한 통계 방식이 사용되었으며, Root Mean Square error (RMSE)와 R-squared와 같은 통계 변수들이 사용된다(Kim et al., 2007; Stone, 1993).

$$RMSE_1 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{-----} \quad (6-9)$$

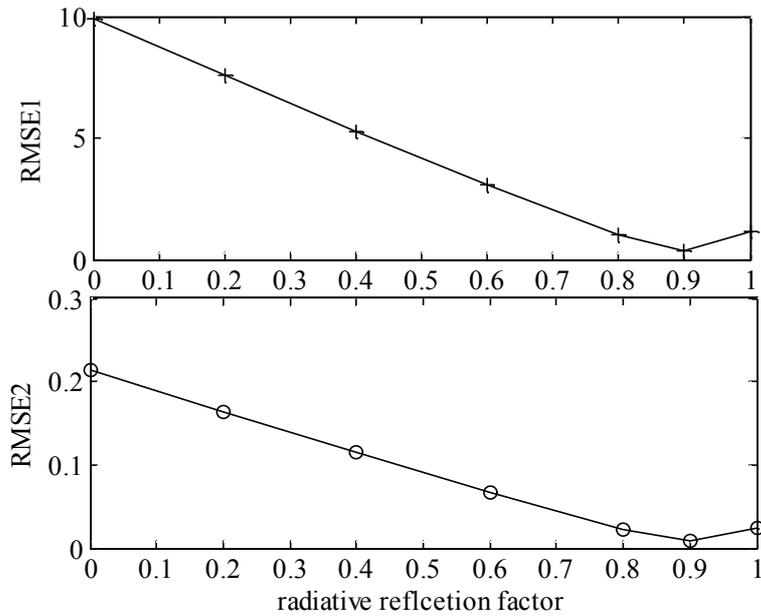
결과는 아래의 식이 RMSE<sub>1</sub>에 비해 정확하다. 오차가 누적될 경우, RMSE<sub>1</sub>은 주요한 결점 중의 하나가 증가될 수 있으므로, 이 문제에 대응하기 위해, Kim et al.(2007) 및 Stone(1993)의 상대 표준 편차를 인용하였다.

$$RMSE_2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{Y_i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{-----} \quad (6-10)$$

세 번째 통계 방식인 R-squared는 측정된 데이터의 예측된 수치들과의 일치 정도를 통계적으로 평가하는 것이다. R-squared가 1과 같으면 완벽한 예측을, 0이면 측정 및 예측된 수치는 전혀 관계가 없다는 뜻이다.

$$R\text{-squared} = \left[ \frac{n \left( \sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right) \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}} \right]^2 \text{-----} \quad (6-11)$$

물성치에 따른 반사판의 반사계수는 0.9±2%이며, 실질적인 계수는 그림 2-35에서와 같이 아래의 RMSE를 근거로 하여 0.9로 결정하였다.

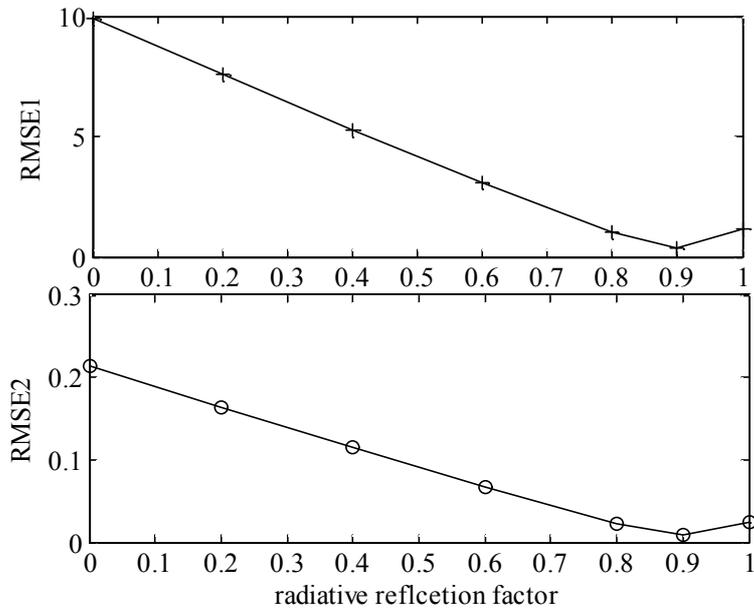


<그림 2-35> 반사판의 반사계수에 대한 RMSE의 민감도.

모델의 보정을 위하여 흡수관 및 공기 사이의 대류열전달계수의 정확한 조정이 필요하다. 작동 유체와 흡수관 사이에서의 대류열전달 및 복사에 대한 수식들은 기상 조건, 특히 풍속에 의존하지 않기 때문에 보정의 대상에 포함시키지 않았고 대류열전달계수만을 보정하였다. 이에, 최소값을 가지는 RMSE 방식을 통해, 흡수관 및 공기 사이에서의 대류열전달 계수를 사용하여 보정이 수행되었다. 마지막 보정 계수는 표 2-7에 나타내었으며, 보정 모델로부터 측정 및 예측된 저장 탱크 내 물의 온도의 비교는 그림 2-36에 나타내었다.

<표 2-7> 보정계수

Model coefficients	Original	Calibrated
Convective heat transfer coefficient between the absorber pipe and the ambient air( $h_w$ )	$2.8+3V$	$2.2+2.4V$

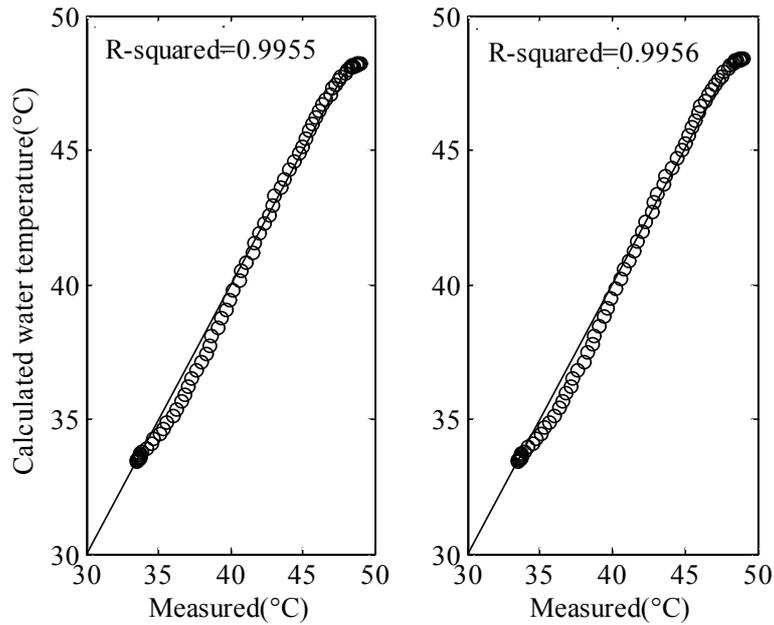


<그림 2-36> 보정 모델로부터 측정 및 예측된 저장 탱크 내 물의 온도의 비교 (09/14/2010).

보정 후, 측정 및 예측된 최대, 최소 및 평균 온도 편차는 각각 1°C에서 0.81°C, 0.1°C에서 0.09°C, 0.39°C에서 0.31°C로 감소하였다(표 2-8). 보정 모델인  $RMSE_1$ ,  $RMSE_2$  그리고 R-squared 방식은 각각 0.5389에서 0.4910, 0.0134에서 0.0125, 0.9955에서 0.9956(그림 2-37)으로 변화하였으며 표 2-9에 표현되었다.

<표 2-8> 보정 전후의 상대오차

Statistical indicators	Original	Calibrated
$RMSE_1$	0.5389	0.4910
$RMSE_2$	0.0134	0.0125
R-squared	0.9955	0.9956



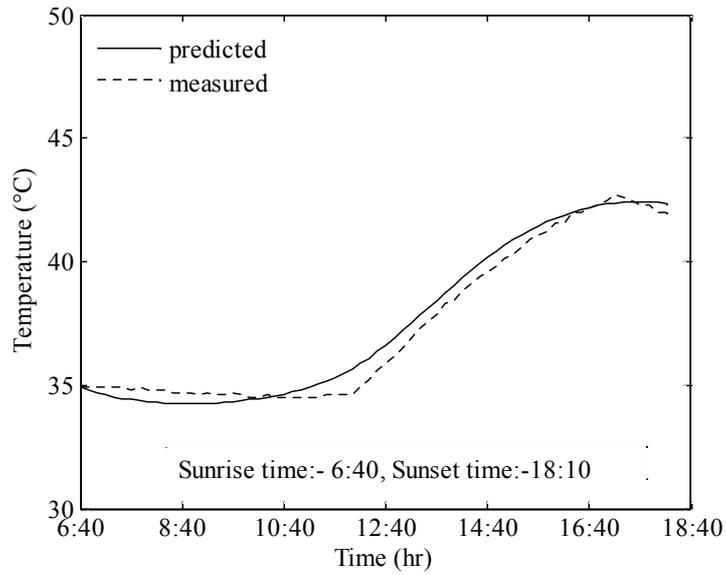
<그림 2-37> 보정 전 및 후 측정 및 예측된 물의 온도, 직선 1:1.

<표 2-9> 보정 후 측정 및 예측된 물의 온도편차

	Predicted(°C)	Measured(°C)	Deviation(°C)
Minimum	33.41	33.5	0.09
Maximum	48.19	49	0.81
Mean	40.97	41.28	0.31
Range	14.78	15.5	0.72

(나) 보정된 모델의 검증

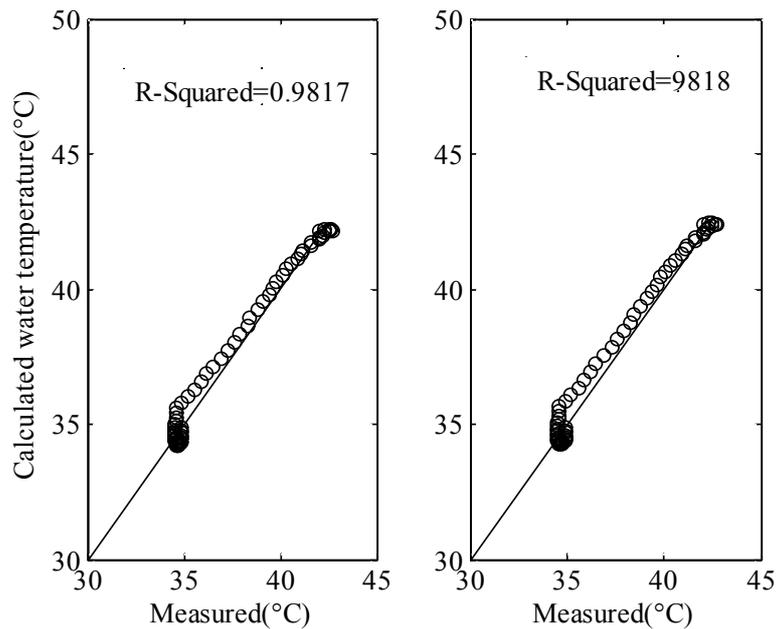
보정된 모델은 동일한 PTC를 사용, 실험을 통해 2010년 7월 10일에 수집된 각각의 데이터를 통해 검증하였다(그림 2-38). 보정 후, 통계 지표인  $RMSE_1$ 과  $RMSE_2$  값은 각각 0.4732에서 0.4333, 0.13에서 0.012로 감소하였고, 결정계수는 0.9817에서 0.9818로 증가하였다. 통계적 오차는 표 2-10을 통해 알 수 있으며, 그림 2-39에서 나타난 측정 및 예측된 온도의 확연한 오차는 발생하지 않았다.



<그림 2-38> 모델 검증을 위해 보정 후 측정 및 예측된 축열조 물의 온도 (10/07/2010).

<표 2-10> 모델 보정 후의 상대오차

Statistical indicators	Original	Calibrated
RMSE <sub>1</sub>	0.4732	0.4333
RMSE <sub>2</sub>	0.13	0.0120
R-squared	0.9817	0.9918



<그림 2-39> 모델 검증을 위한 보정 전 및 후 측정 및 예측된 축열조 물의 온도, 직선 1:1.

#### (4) 요약 및 결론

본 연구에서, 온수 생산을 위한 PTC에서의 에너지 평형 방정식을 시뮬레이션 하여 실험결과와 비교·분석하였으며, 예측 및 실험 결과는 거의 일치한 것으로 나타났다. 흡수관 및 공기 사이에 설정된 열전달 계수는 예측 및 측정된 온도로부터 표준 오차를 최소화함으로써 보정되었다. 보정된 모델은 독립적 실험 데이터의 사용을 통해 검증되었다. 측정 및 예측된 값의 최소, 최대 편차는 보정을 거쳐 각각 0.29%에서 0.26%, 2.04%에서 1.65%로 감소되었다. 이 결과를 통해, 정립된 보정 모델은 PTC 시스템의 성능에 있어 향상된 정확성을 예측할 수 있다. 이에, 정립된 보정 모델은 온수 생산을 위한 PTC의 장기간 성능 예측에 대한 모의실험 도구로 활용될 것으로 기대된다.

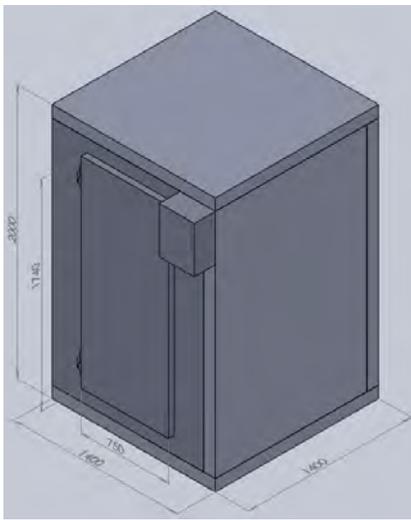
## Nomenclature

$A_a$	흡수관 면적	$m^2$
$A_s$	대기에 노출된 저장 탱크의 면적	$m^2$
$A_w$	작동유체의 열전달 면적	$m^2$
$CR$	집광비(concentration ratio)	
$c_a$	흡수관의 비열	$Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$
$c_w$	작동유체에 비열	$Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$
$c_{pw}$	저장 탱크 내부의 물의 비열	$Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$
$d_{ai}$	흡수관 내부 직경(내경)	$m$
$d_{ao}$	흡수관 외부 직경(외경)	$m$
$d_i$	예측 및 측정된 $i$ 번째 값의 차	
$h_i$	작동유체 및 흡수관 사이에서의 대류열전달계수	$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
$h_{rsky}$	흡수관 및 주변을 둘러싼 대기와의 복사열전달계수	$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
$h_w$	흡수관 및 공기 사이에서의 대류열전달계수	$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
$I$	태양광 강도	$Wm^{-2}$
$k_a$	흡수관의 열전도계수	$Wm^{-1}K^{-1}$
$L$	흡수관 길이	$m$
$m_s$	저장 탱크 내부의 물의 질량	$kg$
$\dot{m}_w$	작동유체의 질량유량	$kg s^{-1}$
$n$	데이터의 수	
$Nu$	Nusselt 수	
$Pr$	Prandtl 수	
$Re$	Reynolds 수	
$T_a$	흡수관 온도	$^{\circ}C$
$T_o$	공기 온도	$^{\circ}C$
$T_s$	저장 탱크 내부의 물의 온도	$^{\circ}C$
$T_{sky}$	유효 대기 온도	$^{\circ}C$
$T_w$	작동유체 온도	$^{\circ}C$
$t$	시간	seconds
$U_L$	PTC의 열손실계수	$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
$U_s$	저장탱크에서 대기로의 손실열전달계수	$Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
$V$	풍속	$m s^{-1}$
$w$	반사판 간극	$m$
$X_i$	$i$ 번째 예측값	
$x$	거리	$m$
$Y_i$	$i$ 번째 측정값	
$\gamma_r$	반사 계수	
$\epsilon_a$	흡수관 방사율	
$\eta_c$	PTC 열효율	
$\eta_o$	광학률	
$\mu_w$	작동유체 점성계수	$kgm^{-1}s^{-1}$
$\rho_a$		$kgm^{-3}$
$\rho_w$	작동유체 밀도	$kgm^{-3}$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann 상수, $5.6697 \times 10^{-8}$	$Wm^{-2}K^{-4}$
$\tau\alpha$	흡수·투과율	

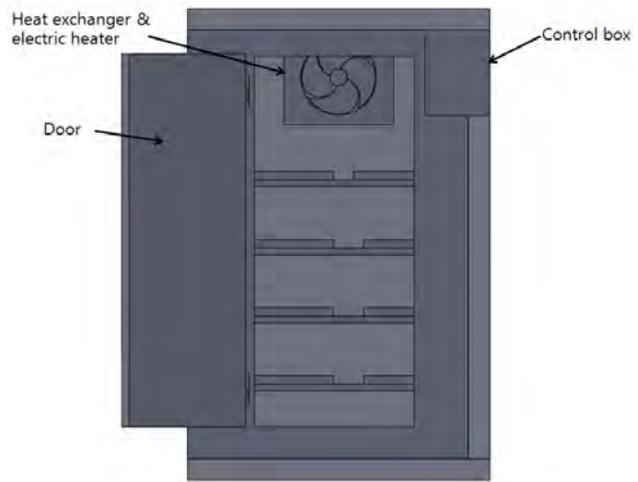
### 제 3 절 태양열 건조시스템 개발

#### 1. 건조장치 설계 및 제작

PTC형 태양열 집열기에 의해 집열된 축열조 내의 온수를 건조기의 열원으로 이용하기 위하여 그림 3-1과 같이 이동식 건조장치를 제작하였다. 건조기 벽체는 단열 효과가 우수한 100mm 두께의 폴리우레탄 판넬을 이용하여 제작하였으며, 크기는 1400×1400×2200mm(L×W×H)이다. 건조장치의 설계도면은 그림 3-2와 같다.



(a) 건조기 외형

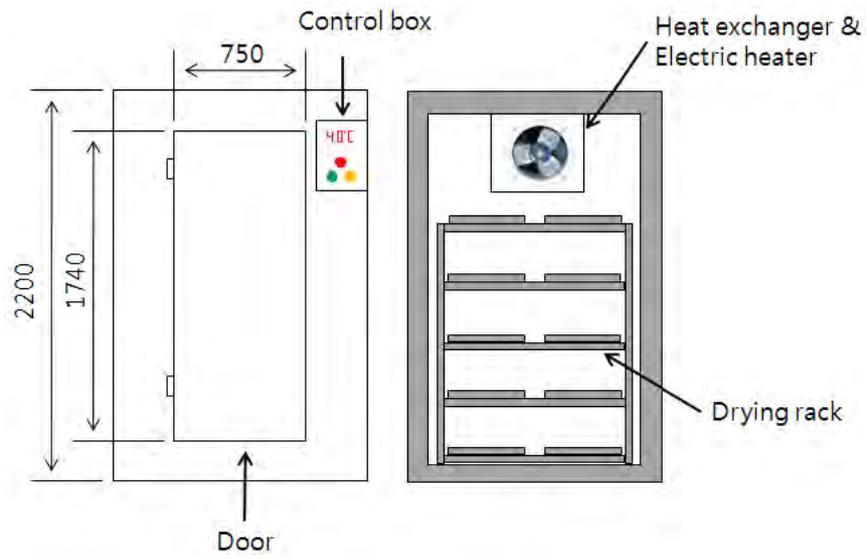


(b) 건조기 내부

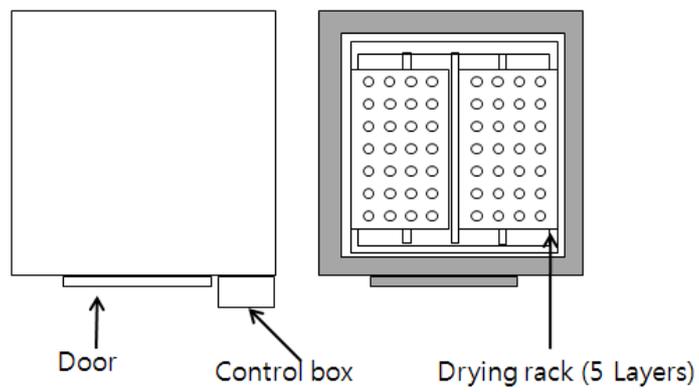


(c) 건조장치 실물

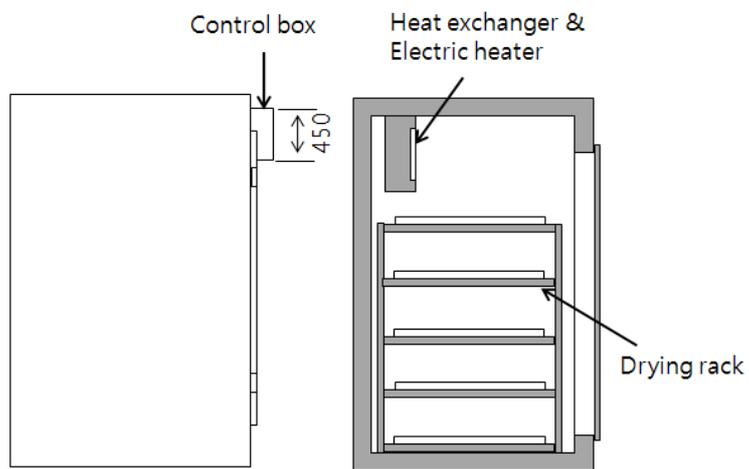
<그림 3-1> 태양열 건조장치.



(a) 건조장치 정면도



(b) 건조장치 평면도



(c) 건조장치 측면도

<그림 3-2> 건조장치 설계도면.

건조장치는 온도제어 컨트롤러, 열교환기, 보조 열원부(전기히터), 송풍기, 온도 검출기, 시료대, 배습을 위한 환기구, 적산전력계(PS-4형) 등으로 구성되어 있다. 건조장치 내부에는 시료대를 설치하기 위해 5단의 철재 프레임이 설치되어 있고, 각 1단의 프레임 위에 2개의 시료대가 설치되어 총 10개의 시료대가 건조장치 내에 설비되어 있다. 건조장치 외부 벽면는 적산전력계 및 환기구와 컨트롤박스가 설비되어 있으며, 그림 3-3과 같다.



(a) 적산전력계 및 환기구



(b) 컨트롤 박스

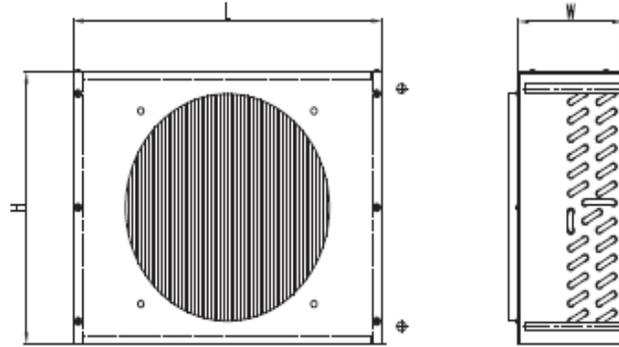
<그림 3-3> 건조장치 외부 벽면에 설치된 적산전력계, 환기구 및 컨트롤박스.

## 2. 열교환기

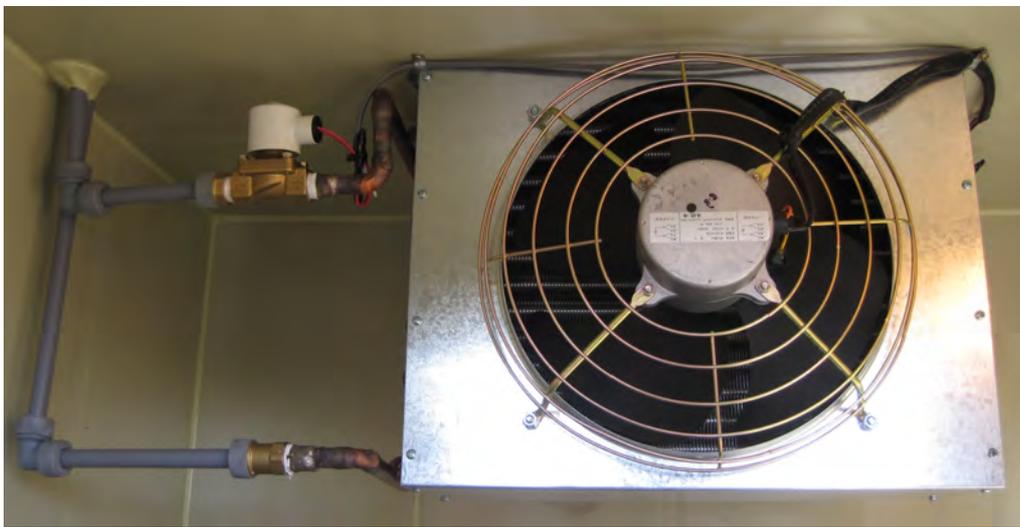
PTC형 태양열 집열기에 의해 집열된 축열조 내의 온수는 건조기 내 상부에 위치한 핀형 열교환기 내를 순환하게 되고, 열교환기에 의해 가열된 공기는 팬에 의해 건조실 내를 순환하게 된다. 건조실 내에 설치된 열교환기는 그림 7-4와 같으며, 열매체가 유동하는 5/16 inch의 동관외부에 알루미늄 핀이 부착된 열교환기는 아연도금 강판 케이스 내에 설비되어 있고, 제원은 표 7-1과 같다. 열교환기의 전열면적은  $14.3\text{m}^2$ 이며, 열교환기 바로 뒤에는 보조열원으로 5kW의 전기 히터가 부착되어 있고, 열교환기 앞면에는 66W의 모터에 의해 구동되는 직경 350mm의 팬이 부착되어 있다.



(a) 핀형 열교환기



(b) 열교환기 도면



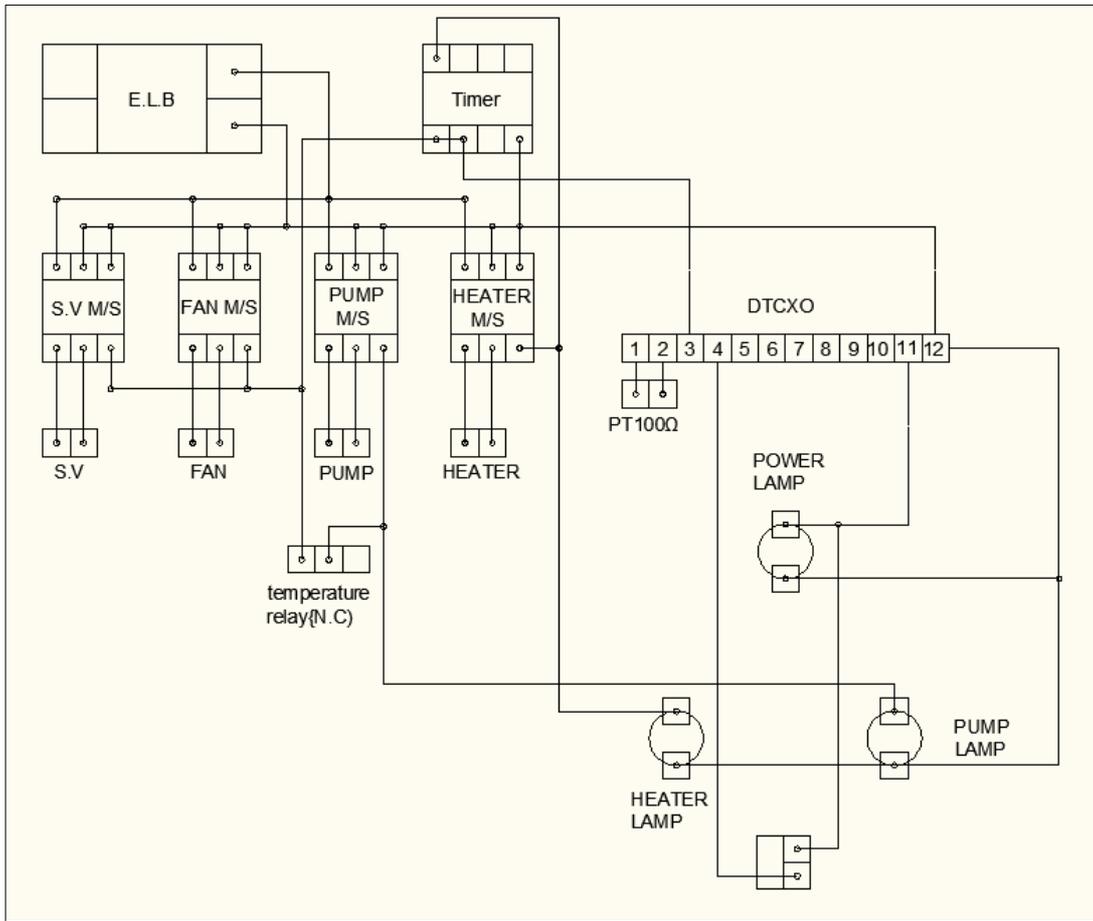
(c) 건조실 내 팬이 부착된 열교환기 실물  
<그림 3-4> 건조장치 내 설비된 열교환기.

<표 3-1> 열교환기 제원

모델	호칭마력	전열면적 (m <sup>2</sup> )	핀피치 (mm)	접속관경	팬(mm)	외형치수(mm) (W×H×L)
CC-I015	2HP	14.3	2.5	12.7/12.7	350	180×422×510

### 3. 제어기의 구성

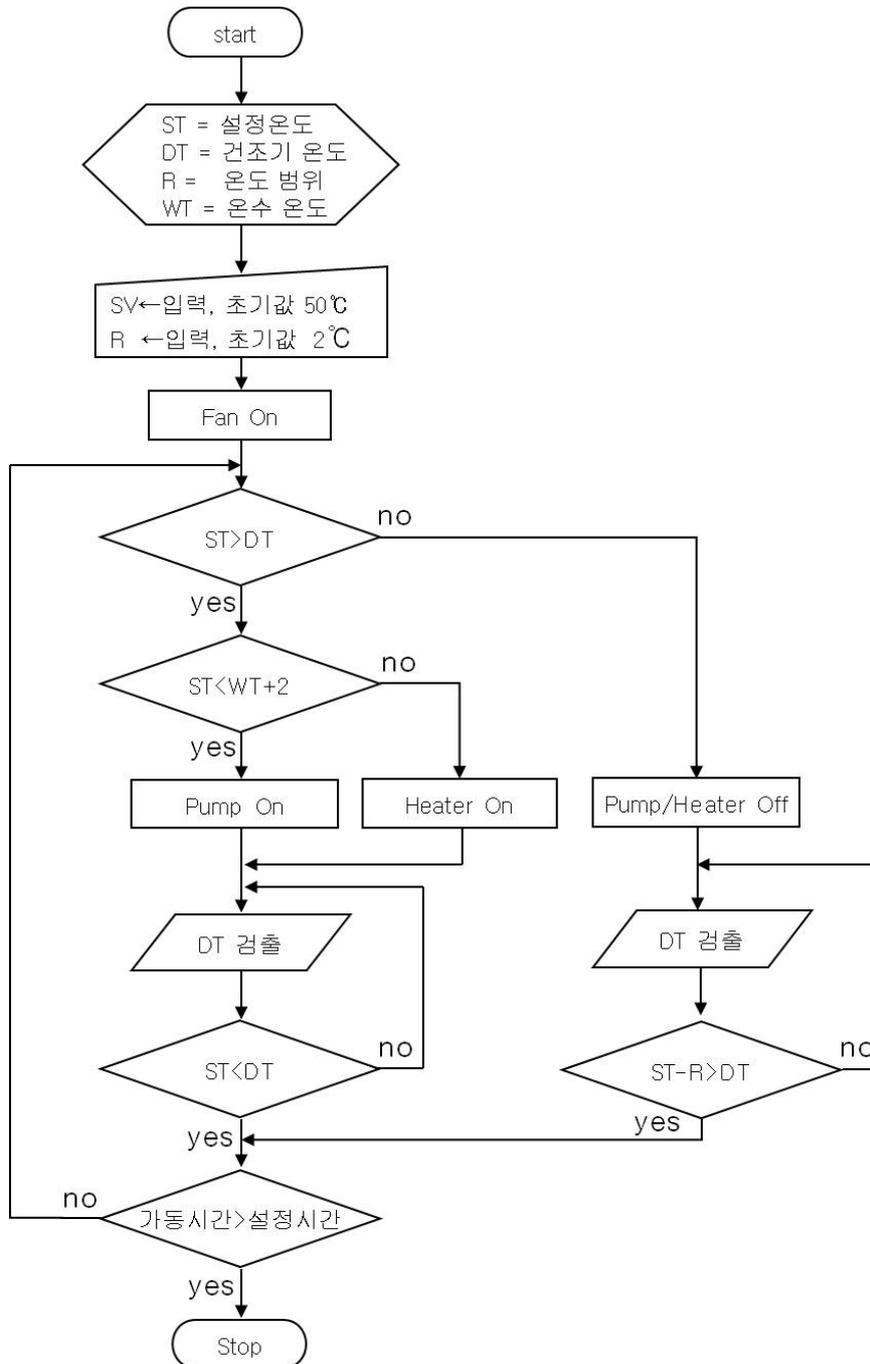
건조실의 건조온도 제어를 위한 제어장치(FOX-2001, 대성 E.N.G, Korea)는 마그네틱 스위치 4개(Pump, Heater, Fan, 솔레노이드 밸브 제어용), 온도 릴레이, 타이머 릴레이, 디지털온도보상수정발진기(DTCXO), 누전차단기, 작동 램프 등으로 구성되었으며 회로 결선은 그림 3-5와 같다.



<그림 3-5> 건조장치 제어회로도.

#### 4. 제어기 동작

제어기는 건조장치 내에 설치되어 있는 온도센서에 의해 검출된 온도와 설정온도를 비교하여 동작한다. 또 건조기 내부온도와 축열조 내 온수온도를 비교하여 온수 또는 보조열원인 히터를 선택하여 구동될 수 있도록 구성되어 있다. 예로 건조기 내 설정온도를 50℃로 할 경우 제어기의 동작 흐름은 다음의 그림 3-6과 같다.



<그림 3-6> 건조기의 제어 흐름도.

그림 3-6에서 ST: 사용자가 설정한 온도를 기억하는 변수(초기 값은 50°C), DT: 건조기 내부에 설치된 온도 검출 센서(PT100Ω)에서 검출된 값을 기억하기 위한 변수, R: 온도 유지 범위를 기억하기 위한 변수(초기 값은 2°C), WT: 온수 배관에 설치된 온도 검출 센서(PT100Ω)에서 검출된 값을 기억하기 위한 변수이며, 건조기의 설정온도에 따라 제어기는 다음과 같이 작동된다.

가. 건조기 온도(ST) 및 온도 유지 범위(R) 설정

나. 송풍기 구동 - 송풍기는 건조과정중에는 연속적으로 구동됨

다. 설정온도(ST)와 건조기 온도(DT) 비교하여 설정온도가 높은 경우

온수온도에 +2℃ 한 값과 설정온도를 비교하여 온수온도가 높으면 펌프를 구동하고 아니면 보조열원인 히터를 구동 → 건조기 온도(DT) 검출 → 설정온도와 건조기 온도를 비교하여 건조기 온도가 설정온도보다 높아질 때 까지 건조기 온도 검출과 비교 과정을 반복 → 가동시간과 설정시간을 비교하여 종료 및 반복 여부 결정

라. 설정온도(ST)와 건조기 온도(DT)를 비교하여 설정온도가 낮을 경우

펌프 또는 히터의 동작 중지 → 건조기 온도(DT) 검출 → 건조기 온도가 설정온도 - 유지범위보다 낮아질 때 까지 건조기 온도 검출과 비교 과정을 반복 → 가동시간과 설정시간을 비교하여 종료 및 반복 여부 결정

## 5. PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치 구성

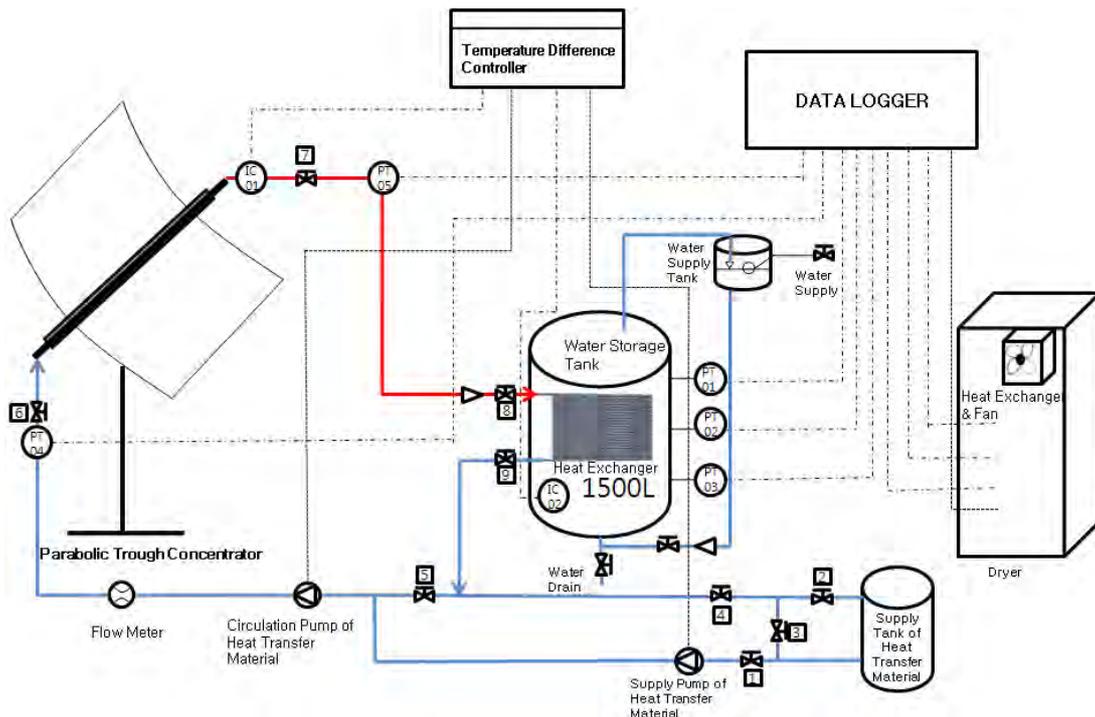
PTC형 태양열집열기에 의해 가열된 열매체는 축열조 내의 열교환기를 순환하면서 축열조 내의 물을 가열하게 되고, 축열조 내의 가열된 온수는 건조기 내의 열교환기를 순환하며 온도가 낮아진 물은 다시 축열조 내로 유입되는 연속 순환과정을 거치면서 건조기 내로 열을 전달하게 된다. 본 연구에서 개발된 태양열 건조시스템은 PTC 태양열집열기, 축열조, 및 건조장치 일체형으로 구성되어 있다(그림 5-7).



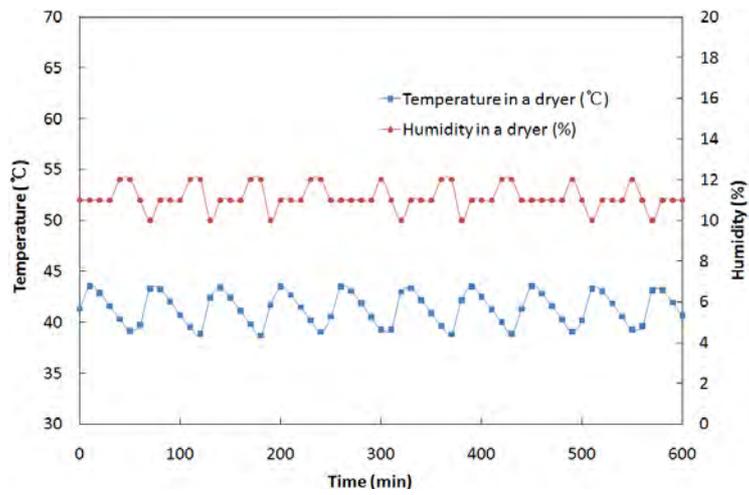
<그림 5-7> PTC 태양열집열기, 축열조 및 건조장치 일체형 태양열 건조시스템.

## 6. 건조기 내 온습도 및 풍속 분석

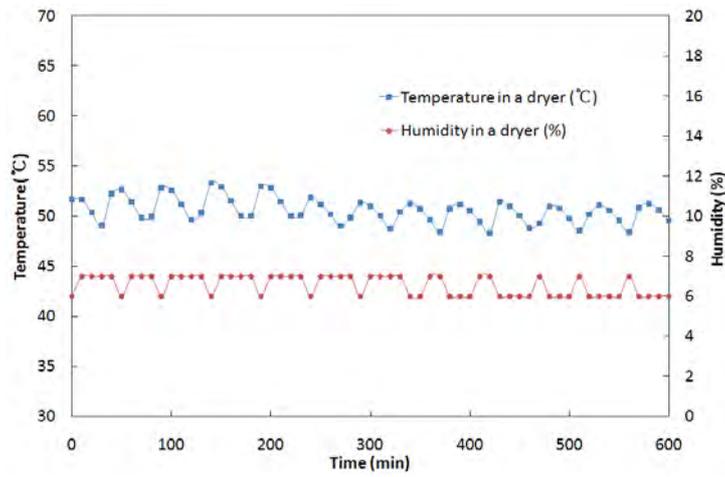
건조온도에 따른 건조기 내부의 온습도 변화를 분석하기 위해 건조기 내 상, 중, 하에 3개의 열전대(T-type)를 설치하였고, 습도센서(50YC, Vaisala, Finland) 1개를 건조기 내 중앙부에 설치하였다(그림 3-8). 그리고 건조기 내 풍속은 건조기 내 상, 중, 하 층에 설치된 시료대 위의 좌우측 2곳 총 6지점에서 열선풍속계(Model 24-6111, Kanomax, Japan)에 의해 측정되었다. 그림 3-9와 같이 건조온도는 40, 50, 60℃에서 건조시간에 따른 건조기 내의 온습도 변화를 조사하였다. 건조온도 40, 50, 60℃에서 각각 온도 변화 폭은 최대 약 5, 4, 3℃로, 사인곡선 형태로 건조온도가 증감하였으나 평균온도는 설정 값과 대체로 잘 일치하였다. 건조온도 40℃에서 상대습도는 최대 약 2%의 변화 폭을 갖고 증감하였으나, 평균적으로 상대습도는 약 11%로 나타났다. 건조온도 50℃ 및 60℃에서 상대습도는 각각 최대 약 1.2% 및 1.0%의 변화 폭을 갖고 증감하였으나, 평균적인 상대습도는 건조온도 50℃에서는 약 7%, 건조온도 60℃에서 약 3.7%로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 설정된 건조온도가 높을수록 건조실 내의 상대습도가 낮아지고, 또한 온도변화 및 상대습도의 변화 폭도 작아지는 것으로 나타났다. 그림 3-10과 같이 건조실 내 풍속분포는 팬과 근접해 있는 최 상층부의 좌우측 시료대 위에서 각각 0.88 m/s 및 0.82 m/s로 나타나, 최하층부의 좌우측 시료대 위에서의 각 풍속 0.49 m/s 및 0.45 m/s보다 큰 것으로 나타났다. 대체적으로 건조기 내 풍속은 상층부일수록 크게 나타났고, 같은 층이라도 우측보다는 좌측 시료대 위에서의 풍속이 다소 높은 것으로 나타났다.



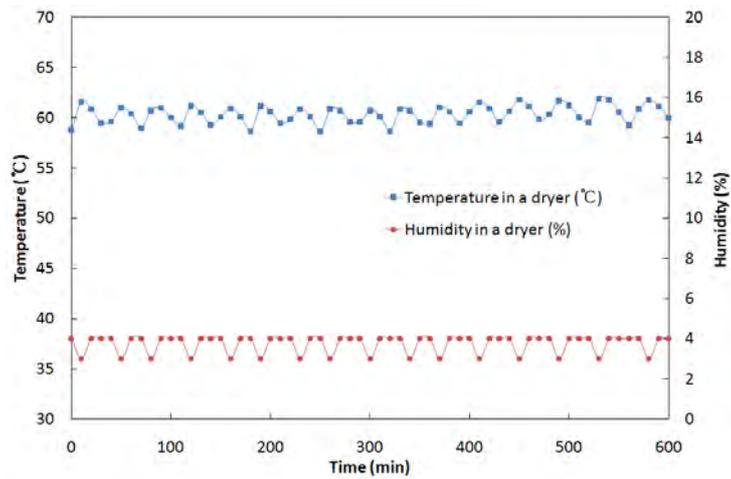
<그림 3-8> PTC형 태양열을 이용한 건조장치 시스템 개략도.



(a) 설정온도: 40°C

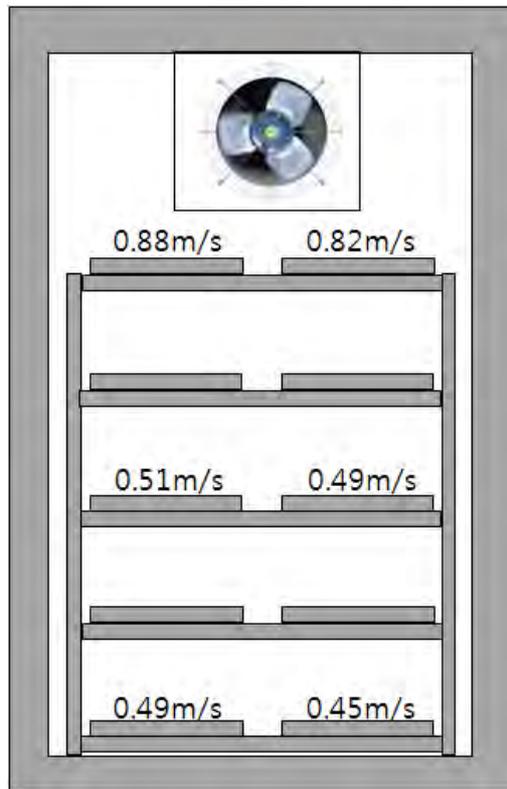


(b) 설정온도: 50°C



(c) 설정온도: 60°C

<그림 3-9> 설정온도에 따른 건조기 내 온습도 변화분석.



<그림 3-10> 건조기 내 위치별 풍속분포 분석.

## 7. PTC 태양열 건조장치에 의한 농산물 건조 특성 분석

### 가. 태양열 건조장치의 필요성

농산물 가공산업은 농산물의 가격지지, 수급조절, 농외소득원 개발을 통한 농가 소득증대와 고부가가치 상품화 수출 등 농업, 농촌의 장기발전을 위하여 매우 중요한 산업이다. 특히 WTO의 뉴라운드 협상 등 시장개방이 가속화됨에 따라 가공을 통한 고부가가치 상품화로 농산물의 경쟁력을 높여야 할 필요성이 절실해 지고 있다. 농산물을 가공하여 제품으로 제조 시 건조공정은 필수적인 공정이다. 특히 농산물은 수확 후 건조방법에 따라 품질에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 품질향상을 위해 원적외선 건조, 마이크로파 건조, 제습건조의 첨단 원리를 도입한 첨단 건조기들이 속속 개발되어 시범 보급되고 있다. 그렇지만 지금까지 개발된 건조 장치는 대부분 화학연료에 의존하는 강제 및 기계식 시스템이 대부분이며, 태양열과 같은 자연에너지를 이용한 건조 장치는 극히 드문 편이다.

현재 농가에서 생산되는 농산물의 경우 대부분 산지에서 일차적으로 햇볕에 널어 말리는 재래식 건조방식이 아직도 일반화 되어있으며 건조기를 사용하는 농가에서는 열풍을 이용한 열풍건조기를 많이 사용하고 있다. 농산물 열풍건조기의 대표적 형태인 곡물건조기의 보급대수는 1973년 약 730대에 불과했으나 농촌노동력 부족현

상 심화와 더불어 수확작업의 기계화에 의해 급속히 증가하여 2005년에는 약 70,363대가 보급되었다. 그리고 고추 및 잎담배 건조에 주로 사용되고 있는 농산물 열풍건조기는 약 184,097대가 보급되어 있다(통계청, 2006).

재래식 건조 방식의 경우 건조대상물의 질과 양이 필연적으로 당시의 기상조건에 직접적인 영향을 받게 마련이기 때문에 산물의 적기건조를 기대하기가 매우 힘들 뿐만 아니라 질적, 위생적인 면에서도 많은 문제점들을 안고 있다. 열풍건조기는 건조기에 농산물을 넣어 가열된 열을 송풍기를 이용하여 건조기 바닥을 통해 불어 넣어주고 배습을 시키면서 건조시키는 장치로 기상조건에 영향을 받지 않으며 건조기간이 짧고 1회 다량건조를 할 수 있다. 그러나 건조기의 대부분이 석유 에너지에 의존하고 있어 에너지원의 97%를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 현실로 볼 때 태양열과 같은 무공해의 자연에너지를 이용한 건조장치의 개발 및 이용은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 농산물의 농가 건조시 에너지절약을 위한 유류 대체용으로 PTC형 태양열집열기에 의해 축열된 태양 복사열을 에너지원으로 사용하는 태양열 건조장치에 의한 농산물의 건조특성을 분석하고자 하였다.

#### 나. 실험재료 및 방법

태양열 건조장치를 이용한 농산물 건조특성실험을 위해 사과(*Malus pumila* MILL), 무(*Raphanus sativus* L.) 및 고추를 실험재료로 사용하였다. 사과, 무 및 고추는 2010년 10월에 마트에서 구입하여 실험에 사용하였다. 본 실험은 PTC형 태양열집열기에 의해 축열된 태양 복사열을 에너지원으로 사용하는 태양열 건조장치를 사용하였다. 사과 및 무는 세척 후 표면의 수분을 제거하고 상온에서 30분 동안 보관한 후 절편 하여 건조실험에 사용하였다. 각 시료의 초기함수율은 크기와 무게를 동일하게 하여 건조오븐(VS-1202D3, Vision Scientific Co., Korea)에서 80℃로 48시간 건조한 후 데시케이터에서 30분간 둔 다음 무게를 측정하여 습량기준함수율로 나타내었다.

PTC형 태양열 건조기의 풍속은 열선풍속계(Model 24-6111, KANOMAX, Japan)를 사용해 건조기의 내부를 상, 중, 하로 나누어 측정하였다. 측정된 평균 풍속은 0.61 m/s였으며 모든 건조실험에서 건조기 내 풍속을 0.61 m/s로 동일하게 설정하였다. 건조시료인 사과 및 무는 두께 1 mm, 2 mm, 3 mm로 절편 하여 건조기 내부 온도 50℃, 60℃, 70℃에서 각 시료별 평형함수율에 도달할 때까지 건조 하였다. 건조기간 동안 각 건조 조건별 정해진 시간 마다 정확도 0.001 g의 전자저울(FA300KV, A&D Co., Japan)로 시료의 무게를 측정하여 함수율 변화를 분석하였으며, 건조속도는 함수율비로 나타내었다.

## 다. 건조이론

### (1) 함수율

농산물의 함수율은 보통 습량기준(wb)백분율과 건량기준(db)백분율의 두 가지로 표시한다(고학균 등, 1996).

#### (가) 습량기준함수율

습량기준함수율이란 물질 내에 포함되어 있는 수분을 그 물질의 총무게로 나눈 값을 말한다.

$$m = \frac{W_m}{W_t} \times 100 = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100 \quad \text{-----} \quad (3-1)$$

여기서,

$m$  : 습량기준함수율(%),  $W_m$  : 물질 내에 포함되어 있는 수분의 무게

$W_t$  : 물질의 총무게,  $W_d$  : 완전히 건조된 물질의 무게(건물량)

#### (나) 건량기준함수율

건량기준이란 완전히 건조된 물질의 무게에 대한 수분의 백분율을 말하며, 다음과 같이 표시된다.

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100 = \frac{100m}{100 - m} \quad \text{-----} \quad (3-2)$$

### (2) 농산물의 건조곡선(drying curve)

농산물의 건조는 내부 확산과 표면증발로 이루어진다. 표면증발보다 내부 확산이 빠르면 건조속도는 표면증발의 속도로 결정되고 표면증발보다 내부 확산이 느리면 내부 확산 속도로 결정된다. 농산물 표면 가까운 곳의 물이 우선 증발하여 표면과 내부와의 사이에 수분 농도차가 생기고 이어서 내부에서 외부로 향하여 물의 확산이 일어나 표면에 도달한 후 증발한다. 그래서 건조가 진행될수록 건조속도는 느려진다. 농산물을 건조하는 동안 수분이 제거되는 양은 일정하지 않고, 그림 1과 같은 곡선을 이룬다. 이들 곡선을 건조곡선(drying curve)이라 한다(그림 3-11).

#### (가) 예열기간

예열기간은 온도는 증가하지만 수분함량에는 큰 변화가 없다. 일반적으로 건조초기의 온도는 열풍보다 온도가 낮기 때문에 표면온도가 열풍과 평형을 이루도록 가온되는 단계로서 증발속도는 약간 증가한다. 표면온도는 마침내 열풍과 평형에 도달한다. 일반적으로 이와 같은 초기 예열기간은 짧기 때문에 건조기간의 계산에서는 무시한다.

#### (나) 향률건조기간

건조물체나 건조조건에 따라 감률건조기간의 모양은 다르지만 일반적으로 향률건조기간과 감률건조기간의 두 구간이 존재한다. 농산물의 건조는 향률건조기간이 짧거나 없는 경우가 많으며 대부분이 감률건조기간인 것이 특징이다. 향률건조기간에 있어서 초기에 고체는 수분함량이 높아 건조표면이 완전히 물의 얇은 막으로 덮여 있고 이 물은 비결합수로 수분활성도( $A_w$ )는 거의 1.0이다. 따라서 주어진 조건에서 건조속도는 고체의 영향을 받지 않고 마치 액체 층의 표면에서 증발과 같으며, 표면으로의 열전달속도에 좌우된다.

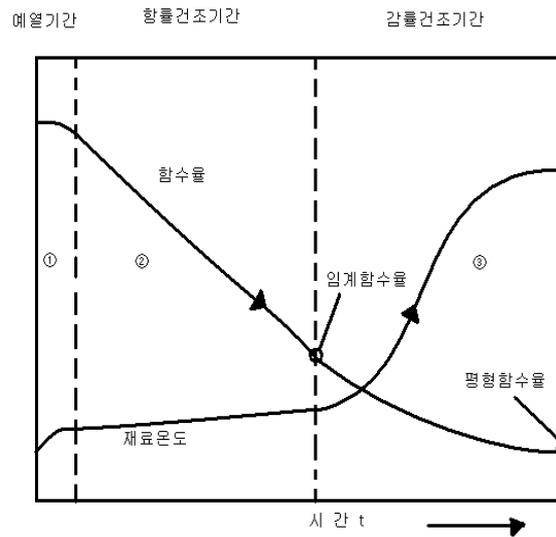
#### (다) 감률건조기간 제1단계

감률건조기간은 표면수분이 전부 제거되고 식품 내부에 있는 수분이 표면으로 이동되면서 건조되는 단계이다. 건조속도가 감소하는 점을 임계수분함량(critical moisture content)이라고 하며 건조시간의 계산에서 중요한 값이다. 이점부터는 고체내부로부터 표면으로의 수분이 이동속도가 감소하여 표면이 더 이상 젖어있는 상태를 유지할 수 없으며, 차츰 표면이 건조되기 시작하여 완전히 건조된다. 구간 동안에서도 일반적으로 수분함량이 감소함에 따라 건조속도가 직선적으로 감소하며, 이를 감률건조기간 제1단계라고 한다.

#### (라) 감률건조기간 제2단계

그림 3-11과 같이 표면이 완전히 건조되는 점으로부터 감률건조기간 제2단계가 시작된다. 증발 면이 표면에서 내부로 천천히 후퇴하여 건조속도는 더욱 감소한다. 이 기간 동안의 건조속도는 주로 고체내부에서 수분이동속도에 영향을 받으며, 열풍의 풍속 등과 같은 외부조건의 영향은 적다. 감률건조기간에 증발되는 수분의 양은 비교적 적지만 건조시간은 오래 걸리기 때문에 총 건조 시간의 대부분은 감률건조기간이다. 감률건조가 계속되면 표면이 딱딱하게 굳어지고 표면으로 부터의 열전달과 내부에서 외부로의 수분이동에 장애를 받는다. 이때 건조속도는 급격히 감소

하고 식품의 품질에 표면피막경화 같은 여러 가지 좋지 않은 변화가 일어난다(변유량 등, 2003).



<그림 3-11> 농산물 건조곡선.

### (3) 건조모델

피 건조물의 건조속도를 나타내는 방정식을 건조모델이라고 한다. 건조모델에는 얇은 두께의 곡물층이나 뿌리작물, 과일, 식품 등의 절편의 건조속도를 나타내는 방정식이 있는데 이 방정식을 박층건조모델이라고 한다. 박층건조모델은 향률건조모델과 감률건조모델로 구분하여 나타낸다. 그 중 감률건조모델의 건조속도는 피 건조물 내부의 수분이동속도에 영향을 받으며 농산물이나 식품 내부의 수분이동은 농도 차에 의한 수분확산에 의한 것으로 알려지고 있다. 따라서 감률건조기간의 건조속도는 다음과 같은 식의 수분확산방정식으로 표시된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \text{----- (3-3)}$$

여기서,

- M: 피 건조물 내부의 임의지점의 건량기준함수율(kg-수분/kg-건물)
- t: 건조시간(hr)
- D: 수분확산계수(m<sup>2</sup>/hr)
- r: 피 건조물 중심으로 부터의 거리(m)
- C: 피 건조물의 모양에 따라 결정되는 상수로서 무한평판은 0, 무한원통은 1, 구는 2임

식 (3-3)의 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M(r, 0) &= M_o \\ M(r_o, \theta) &= M_e \end{aligned}$$

여기서,

$r_o$ : 무한원통과 구의 경우에는 반경이고 무한평판의 경우에는 두께의 1/2

$M_o$ : 건량기준 초기함수율

$M_e$ : 건량기준 평형함수율

식 (3-3)의 해를 구하여 함수율로 표시하면 식 (3-4)와 같다.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{r_o^2} D t\right) \quad (3-4)$$

여기서,

$M$ : 건량기준 함수율

$(M - M_e)/(M_o - M_e)$ : 함수율 비(MR)

앞의 식에서 건조시간  $t$ 가 증가함에 따라 둘째 항 이상의 값은 대단히 적어지므로 첫째 항만이 유효한 항이 된다. 따라서 앞의 식을 간단화하면 다음과 같은 Lewis model 식을 얻을 수 있다(Henderson and Perry, 1976).

$$MR = A \exp(-Kt) \quad (3-5)$$

식 (3-5)의  $K$ 는 건조상수( $\text{hr}^{-1}$ )이고  $A$ 는 상수이며, 피 건조물의 모양에 따른 값으로서 박층 건조 실험에 의하여 결정된다. 무한평판 모양의 피 건조물일 경우 건조상수( $K$ )는 다음의 식(3-6)과 같이 수분확산계수,  $D(\text{m}^2/\text{hr})$ 와 관계되어진다(Lee et al., 2004). 식 (3-6)에서  $L$ 은 피 건조물의 1/2두께를 나타낸다.

$$K = \left\{ \frac{\pi^2 D}{4L^2} \right\} \quad (3-6)$$

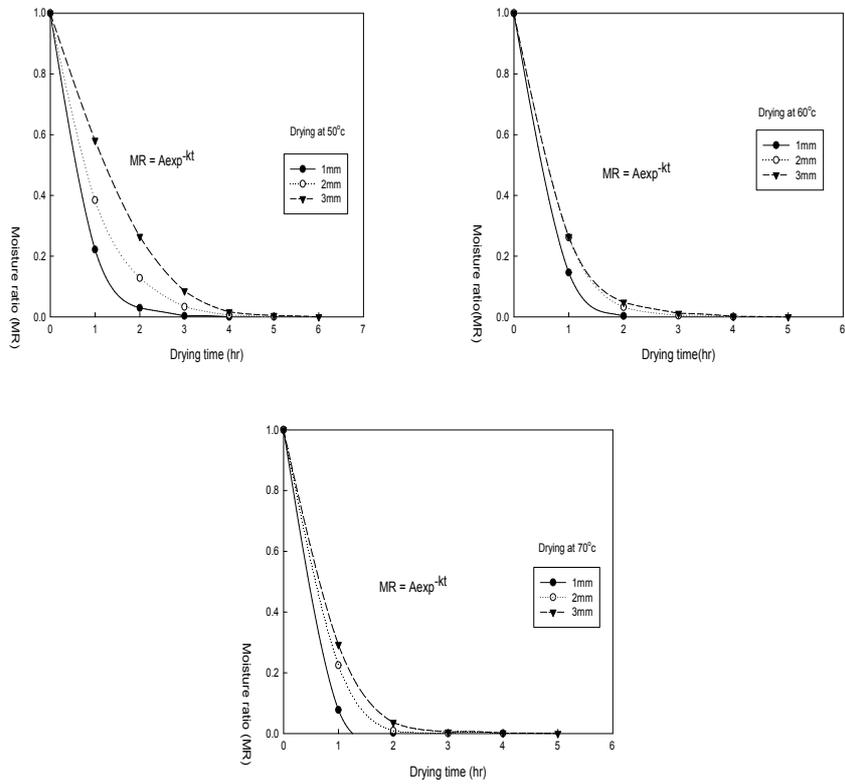
다. 결과 및 고찰

실험재료(experimental material)를 건조오븐에서 80℃로 48시간 건조한 다음 초기 함수율을 측정하였다. 사과, 무 및 고추의 초기 함수율은 각각 84.65%(w.b.), 93.9%(w.b.), 및 78.36%(w.b.)로 나타났다.

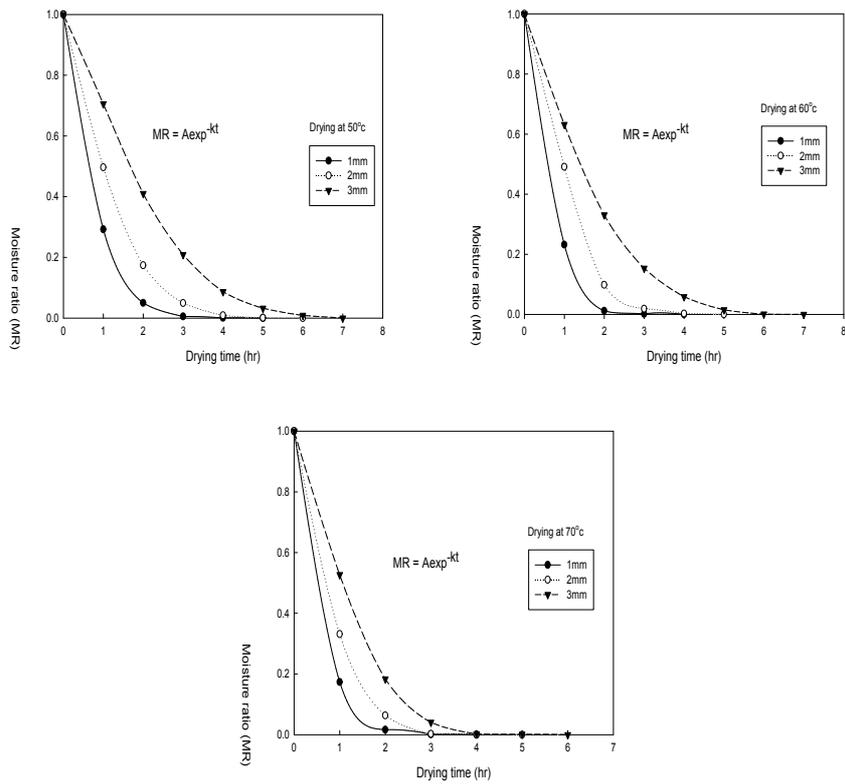
사과, 무 및 고추의 평형함수율과 반 건조시간, 건조시간은 표 3-2와 같으며 건조 온도가 높을수록 평형함수율은 낮아지고 반 건조시간, 건조시간은 짧아지는 것으로 나타났다. 사과 및 무의 경우 같은 건조온도에서는 두께가 두꺼울수록 평형함수율은 높아지고 반 건조시간 및 건조시간은 길어지는 것으로 나타났다. 특히 무 건조시 건조온도 증가와 두께 감소에 따른 반 건조시간이 크게 단축됨을 알 수 있다. 고추의 경우는 건조온도가 다소 낮아 반 건조시간 및 건조시간이 길게 나타났다. 또한 사과 및 무의 건조온도가 높을수록 함수율비의 기울기가 큰 것으로 나타났으며, 두께가 두꺼울수록 함수율 비의 기울기가 작아지는 것으로 나타났다(그림 3-12, 3-13). 고추는 건조 24시간 까지 함수율비가 대체로 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다(그림 3-14).

<표 3-2> 농산물의 건조 및 반 건조시간

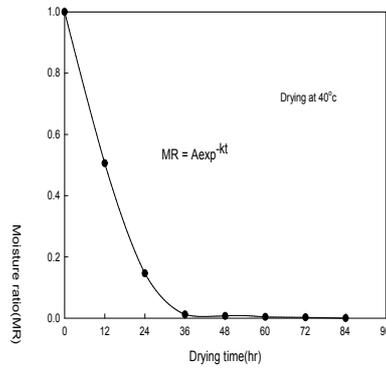
Experimental material	Drying temperature (°C)	Thickness (mm)	EMC (% d.b.)	Half drying time (MR = 0.5) (min)	Drying time (hr)
Apple	50	1	0.036	42	4
		2	0.054	48	5
		3	0.056	84	6
	60	1	0.020	40	3
		2	0.024	48	4
		3	0.027	48	5
	70	1	0.018	30	3
		2	0.027	42	4
		3	0.027	48	5
Radish	50	1	0.054	60	5
		2	0.065	72	6
		3	0.196	108	7
	60	1	0.042	42	4
		2	0.061	60	5
		3	0.090	90	7
	70	1	0.033	36	4
		2	0.034	48	5
		3	0.089	72	6
Rep Pepper	40	-	0.250	720	48



<그림 3-12> 사과 절편의 건조곡선.

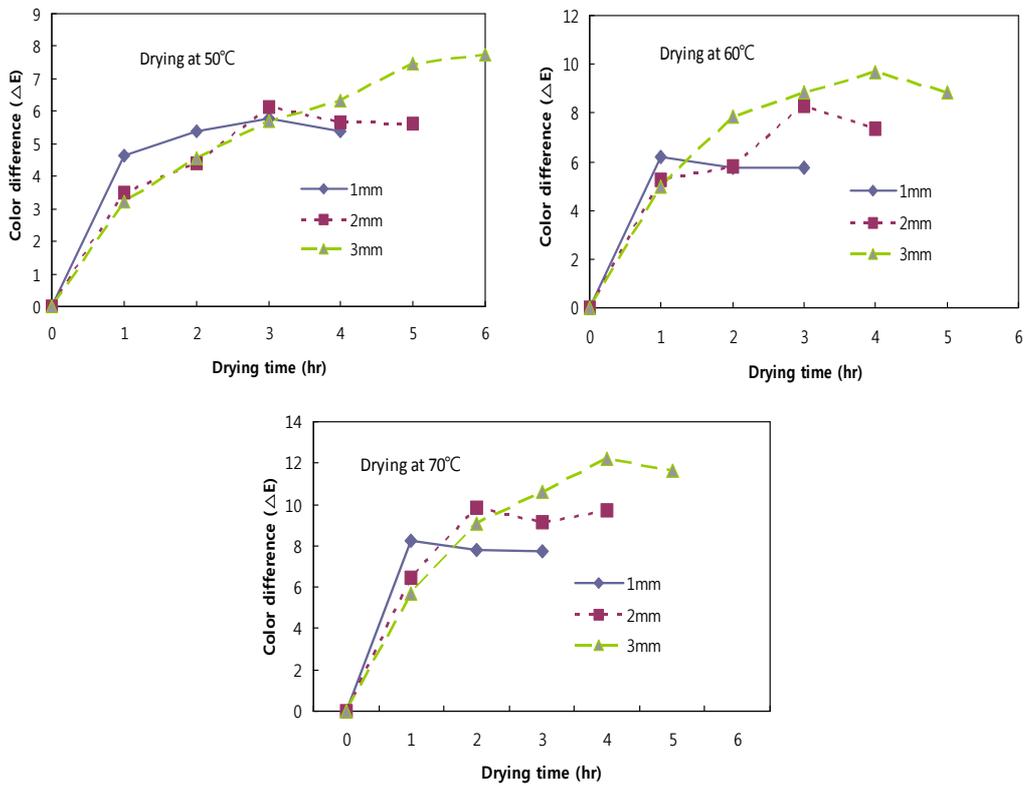


<그림 3-13> 무 절편의 건조곡선.

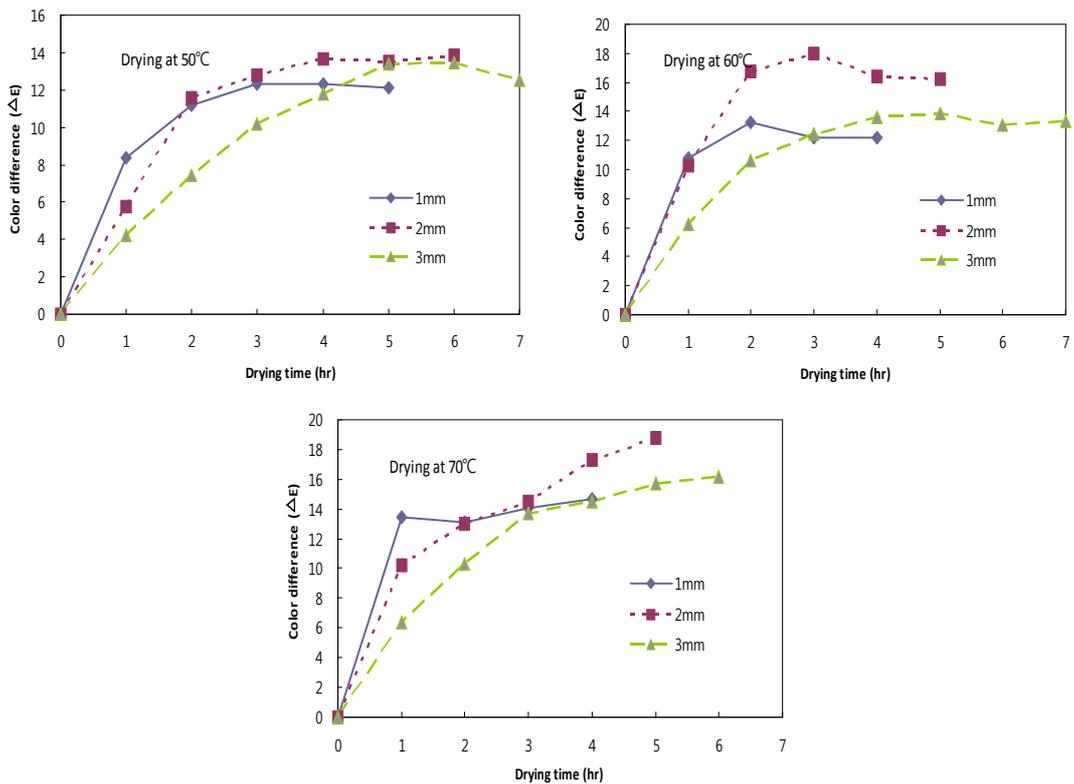


<그림 3-14> 고추의 건조곡선.

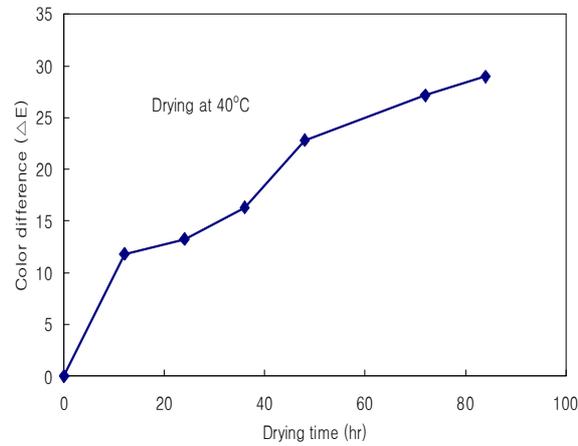
건조기간 동안 건조온도 및 시료 두께에 따른 사과 및 무의 색차( $\Delta E$ ) 변화는 각각 그림 3-15 및 그림 3-16과 같다. 또한 건조온도 40°C에서 건조기간 동안 고추의 색차( $\Delta E$ ) 변화를 그림 3-17에 나타내었다. 사과는 건조온도가 높을수록 건조시간이 증가함에 따라 색차( $\Delta E$ )가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 건조기간 초반 및 중반까지는 시료의 두께가 얇을수록 색차( $\Delta E$ )가 증가하는 것으로 나타났으나, 건조기간 중반기부터 후반기까지는 시료 두께가 두꺼울수록 오히려 건조기간 동안 색차( $\Delta E$ )가 커지는 것으로 나타났다. 무는 건조온도가 높을수록 건조기간 동안 건조시간에 따른 색차( $\Delta E$ )가 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 모든 건조온도에서 두께 2mm인 시료가 건조시간이 증가함에 따라 건조기간 중반부터 후반기까지 색차( $\Delta E$ )가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 건조시간에 따른 고추의 색차변화는 건조 초기에 급격히 증가하였으며, 건조 후반기에는 다소 색차변화의 기울기가 낮아지는 경향이 있었으나, 사과 및 무에 비해 전 건조기간 동안 색차변화가 큰 것으로 나타났다(그림 3-17).



<그림 3-15> 건조온도에 따른 무 절편의 색차변화.



<그림 3-16> 건조온도에 따른 사과 절편의 색차변화.



<그림 3-17> 건조온도 40°C에서 고추의 색차변화.

Lewis model인 (3-5)식을 적용하여 건조온도 변화에 따른 사과 및 무의 A, K의 회귀분석하여 구하였다(표 3-3). 모든 건조조건에서 결정계수( $r^2$ ) 값이 0.97이상으로 나타나, 건조시간에 따른 함수율비(MR)가 지수함수로 잘 표현됨을 알 수 있다. 모든 건조조건에서 사과 및 무 모두 두께가 두꺼울수록 K값은 작아지고 A값은 커지는 것으로 나타났다. 또한 건조온도가 높을수록 A값은 작아지고 K값은 커지는 것으로 나타났다. 식 (3-6)을 이용하여 시료별 건조온도에 따른 수분확산계수(D)를 구하였다(표 3-3). 사과 및 무 모두 건조온도가 높을수록 수분확산계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 사과 및 무 각각 수분확산계수 값은  $3.96629 \times 10^{-7} \sim 7.08264 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$  및  $3.10773 \times 10^{-7} \sim 4.64735 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다.

<표 3-3> 실험조건에 따른 A, K, D, r<sup>2</sup>

Experimental material	Drying temperature (°C)	Thickness (mm)	A	K(hr <sup>-1</sup> )	D(m <sup>2</sup> /hr)	r <sup>2</sup>
Apple	50	1	1.0009	1.5453	3.96629×10 <sup>-7</sup>	0.9995
		2	1.0036	1.0011		0.9990
		3	1.0245	0.6869		0.9879
	60	1	1.0004	1.9612	6.73151×10 <sup>-7</sup>	0.9995
		2	1.0020	1.4072		0.9984
		3	1.0023	1.3690		0.9995
	70	1	1.0000	2.8559	7.08264×10 <sup>-7</sup>	1.0000
		2	1.0017	1.5676		0.9980
		3	1.0033	1.3137		0.9973
Radish	50	1	1.0026	1.2959	3.10773×10 <sup>-7</sup>	0.9985
		2	1.0144	0.8257		0.9933
		3	1.0434	0.5104		0.9826
	60	1	1.0018	1.5364	3.52526×10 <sup>-7</sup>	0.9979
		2	1.0197	0.9418		0.9765
		3	1.0248	0.5693		0.9901
	70	1	1.0004	1.7774	4.64735×10 <sup>-7</sup>	0.9998
		2	1.0044	1.1902		0.9971
		3	1.0200	0.8009		0.9883
Rep Pepper	40	-	1.0193	0.0718	-	0.9867

라. 요약 및 결론

본 연구에서는 농산물의 농가 건조시 에너지절약을 위한 유류 대체용으로 PTC형 태양열집열기에 의해 축열된 태양 복사열을 에너지원으로 사용하는 태양열 건조장치에 의한 농산물의 건조특성을 분석하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 건조온도가 높을수록 반 건조시간 및 건조시간이 짧아지는 것으로 나타났고, 같은 건조온도에서는 두께가 두꺼울수록 반 건조시간 및 건조시간은 매우 길어지는 것으로 나타났다. 사과 및 무의 건조곡선은 건조온도가 높을수록 함수율비(MR)의 기울기가 커짐을 나타냈고, 두께가 두꺼울수록 함수율비(MR)의 기울기가 작아짐을 나타냈다.
- (2) 사과 및 무 모두 건조온도가 높을수록 건조시간이 증가함에 따라 색차(ΔE)가 증가하는 것으로 나타났다. 전 건조기간 동안 고추의 색차변화는 사과 및 무에 비해 큰 것으로 나타났다

- (3) 모든 건조조건에서 결정계수( $r^2$ ) 값이 0.97이상으로 나타나, 건조시간에 따른 함수율비(MR)가 지수함수로 잘 표현됨을 알 수 있었다. 모든 건조조건에서 사과 및 무 모두 두께가 두꺼울수록 건조상수 K값은 작아지고 A값은 커지는 것으로 나타났으며, 건조온도가 높을수록 A값은 작아지고 K값은 커지는 것으로 나타났다.
- (4) 사과 및 무 모두 건조온도가 높을수록 수분확산계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 사과 및 무 각각 수분확산계수 값은  $3.96629 \times 10^{-7} \sim 7.08264 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$  및  $3.10773 \times 10^{-7} \sim 4.64735 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{hr}$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다.

## 제 4 절 태양열 건조장치의 성능 및 경제성 분석

### 1. 태양열건조장치 성능분석

#### 가. 실험 목적 및 방법

본 실험은 본 연구에서 제작한 PTC형 태양열집열기를 이용해 축열조에 저장된 물을 가열하여 열원으로 이용하는 농산물건조기를 이용하여 건조온도에 따라 소요되는 온수의 양과 적정온도를 구명하였다. PTC형 태양열집열기를 이용해 축열된 온수를 이용하여 건조를 진행 할 경우의 에너지 소모량을 기존의 유류 건조기와 비교하여 에너지 절감 효과에 의한 경제성을 분석하였다. 또한 본 실험에서 효율에 영향을 미칠 수 있는 요소들 중 몇 가지 조건들은 다음과 같이 정하고 실험을 수행하였다.

- (1) PTC형 태양열집열기를 이용한 건조기는 단열효과가 좋은 100mm 두께의 폴리우레탄 판넬을 사용하여 내부 평면의 면적  $1.9\text{m}^2(1.38\text{m}\times 1.38\text{m})$ 로 제작되었다.
- (2) PTC의 집열면적  $4\text{m}^2$ 로 축열 할 수 있는 온수의 양과 온도는 가을철 평균 일사량을 기준으로  $60^\circ\text{C}$ 의 온수를  $80^\circ\text{C}$  까지 집열 할 때 하루 약 600ℓ의 온수를 생산할 수 있으나 실험이 겨울철에 이루어진 관계로  $80^\circ\text{C}$ 의 온수 120ℓ만을 축열하여 실험을 수행하였다.
- (3) 건조기 내부의 전기히터는 5kW이며, 전력 사용량을 측정하기 위해 전력량계(PS -4형)를 부착하였다.
- (4) 열교환기 전열면적은  $14.3\text{m}^2$ 이며, 유량은 분당 5ℓ가 흐르도록 하였다.
- (5) 건조기 내부의 초기 온도는  $15^\circ\text{C}$ 로 맞추고 건조과정을 시작하였다.
- (6) 배수는 자동으로 이루어지며, 건조과정은 일정 온도를 유지하며 이루어지는 것으로 가정하였다.
- (7) 일반적으로 건조기의 송풍에 들어가는 전력소모량은 모든 형태의 건조기에서 공통적인 것으로 경제성 분석에서 본 실험에 이용된 66W 송풍 모터의 10시간 동안 계속해서 동작함으로 소비되는 전력량 660Wh는 전체 가동시간에 소비한 전력량에서 제외하고 계산하였다.

건조시간은 10시간, 건조기 내부 설정온도는  $50^\circ\text{C}$ 와  $60^\circ\text{C}$ 의 2가지 경우에 대해 각각 실험을 수행하였으며, 건조기의 동작은 온수의 온도와 건조기 내부 온도를 비교하여 온수의 온도가 내부온도보다 높으면 온수로만, 낮으면 전기히터로만 동작하도록 설정하였다. 건조기 가동시간 동안 축열조 내 온수의 온도변화 계측을 위해 축열조 상(PT01), 중(PT02), 하(PT03)의 3곳에 온도센서(PT100Ω)를 설치하였고, 건조실내의 온도변화 계측을 위해 건조기 내의 상, 중, 하 위치에 열전대(T type)를

설하하였다. 외기온도 측정을 위해 열전대(T type)를 지상 1 m 지점의 그늘진 곳에 설치하였다. 각 온도센서는 Data Logger(GL800, GEAPHTEC, USA)에 연결하여 온도를 10분 간격으로 실시간 계측하여 평균하였다.

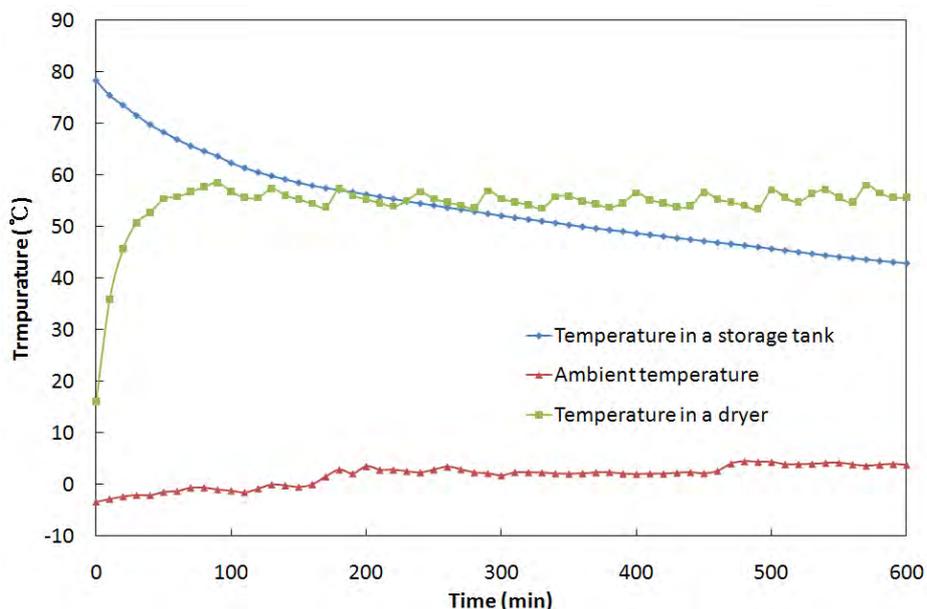
## 나. 결과 및 고찰

### (1) 건조기의 설정온도 60℃

#### (가) 온수와 전기 병행 사용한 건조기 실험

- 실험일시: 12월 10일 08:00 ~ 18:00(10시간)
- 외기 평균 온도: 1.8℃(-3.4℃ ~ 3.8℃)
- 축열조의 온도가 설정온도 60℃보다 낮아지는 시간(온수에 의한 온풍 발생이 중지되고 전기히터가 가동되기 시작하는 시간): 180분
- 건조기 10시간 가동시 소비 전력량: 1.999kWh(2.659kWh-0.66kWh)
- \* 0.66kWh(66W×10h)는 송풍기에서 소비된 전력량

그림 4-1에 나타난 바와 같이 초기 100분 동안 건조기 내 초기온도 15℃에서 설정온도 60℃까지 상승시키기 위해 빠른 열 교환이 이루어지면서 온수의 온도가 급격하게 내려간다. 이후 180분까지는 온도 유지를 위해 간헐적으로 열교환이 이루어지고 있으며, 180분 이후는 온수의 온도가 설정온도 이하로 내려가면서 전기히터만으로 작동 되어, 온수의 온도는 축열조의 자연 열손실에 의한 온도 강하만이 이루어져 완만하게 하강한다.



<그림 4-1> 설정온도 60℃에서 건조기 내 온도 및 축열조 온수 온도 변화.

(나) 전기히터만을 사용한 건조기 실험

- 실험일시: 12월 20일 08:00 ~ 18:00(10시간)
- 외기 평균 온도: 2.5℃(-0.8℃ ~ 7.4℃)
- 10시간 가동 시 소비 전력량: 2.719kWh(3.379kWh-0.66kWh)

순수하게 전기히터만을 사용하여 건조과정을 진행 한 실험을 기준으로 온수와 전기를 병행하여 사용한 실험을 비교해보면 절약 할 수 있는 에너지는 약 26.5%정도 된다.

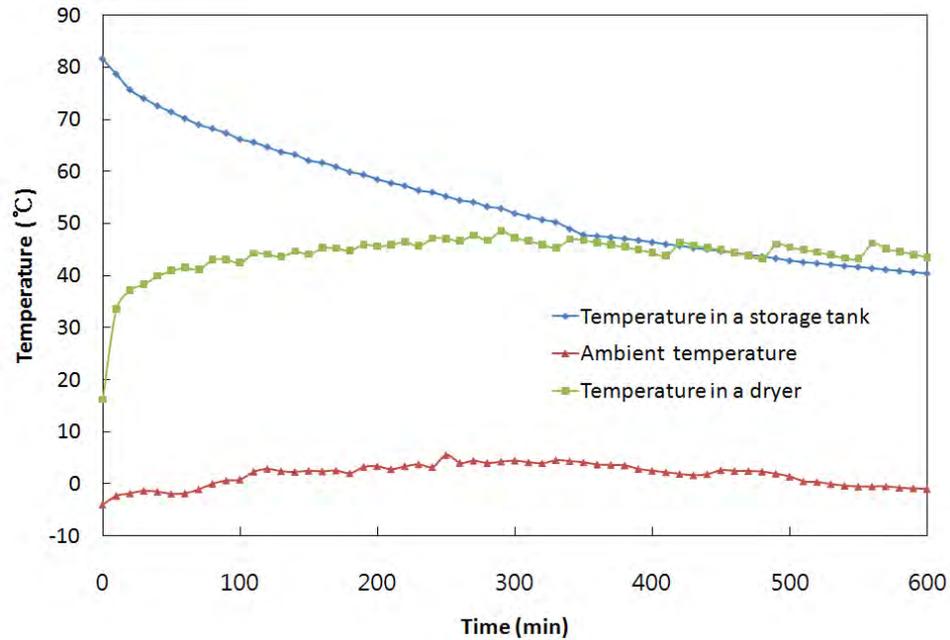
$$\begin{aligned} \text{절약에너지} &= \frac{\text{전기에너지만사용시소비전력량} - \text{온수와 전기 병행 사용시 소비전력량}}{\text{전기에너지만사용시 소비전력량}} \times 100\% \\ &= \frac{2.719kWh - 1.999kWh}{2.719kWh} \times 100 = 26.5\% \end{aligned}$$

(2) 건조기의 설정온도 50℃

(가) 온수와 전기 병행 사용 건조기 실험

- 실험일시: 12월 18일 08:00 ~ 18:00(10시간)
- 외기 평균 온도 : 2.0℃(-4.1℃ ~ 6.9℃)
- 축열조의 온도가 설정온도 50℃보다 낮아지는 시간(온수에 의한 온풍 발생이 중지되고 전기히터가 가동되기 시작하는 시간): 420분
- 10시간 가동 시 소비 전력량: 0.589kWh(1.249kWh-0.66kWh)

그림 4-2에 나타난 바와 같이 초기 60분 동안에는 건조기 내부온도 15℃에서 설정온도 50℃까지 상승시키기 위해 온수와의 열 교환이 지속적으로 이루어지며, 그 이후 420분까지는 20~30분을 주기로 열교환기 내부로 온수 공급의 차단 및 순환이 반복되며 동작한다. 또한 그 이후는 열교환기로의 온수 순환은 차단되고 전기히터만에 의해 동작됨을 알 수 있다.



<그림 4-2> 설정온도 50°C에서의 건조기 내 온도 및 축열조 온수 온도 변화.

(나) 전기히터만을 사용한 건조기 실험

- 실험일시 : 12월 23일 08:00 ~ 18:00(10시간)
- 외기 평균 온도 : 1.9°C(-3.0°C ~ 6.4°C)
- 10시간 가동 시 소비 전력량 : 1.509kWh(2.169kWh-0.66kWh)
- 총 소비 전력량 : 1.509kWh

위 두 가지 경우의 비교 실험에서 순수하게 절약 할 수 있는 에너지는 약 60.96% 정도 된다.

$$\text{에너지 절약} = \frac{1.509kWh - 0.589kWh}{1.509kWh} \times 100 = 60.96\%$$

다. 요약 및 결론

(1) 실험 결과 분석

- (가) 약 0.58평 정도의 건조기를 내부온도 60°C로 가동시킬 때, 축열조 내 80°C의 온수 120ℓ로 약 180분정도 건조가 가능하다.
- (나) 동일 한 건조기에서 내부온도를 50°C로 가동시킬 때 80°C의 축열조 온수 120ℓ로는 약 420분 정도 건조가 가능하다.
- (다) 위 결과를 바탕으로 태양열을 이용해서 매일 60°C의 온수 960ℓ를 80°C까지

가열 할 수 있으며, 온수만을 이용하여 0.58평형 건조기를 60℃로 24시간 가동 할 수 있고, 50℃로 건조시킬 경우 축열조의 온수 411ℓ 만 있으면 건조기의 가동이 가능하다고 결론지을 수 있다.

(2) 이론적 분석 및 설계

건조기 가동 실험 결과를 이론적으로 분석하기 위해 120ℓ의 80℃ 온수를 60℃로 낮출 때 발생할 수 있는 에너지를 계산해보면 다음과 같다.

$$Q = CM\Delta T = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot\text{C}} \times 120,000\text{g} \times 20\text{C} = 2,400\text{kcal}$$

그리고 실험에 의해 얻어진, 건조기를 60℃로 10시간동안 전기로만 구동하기 위해 필요한 에너지(2.719kWh)를 kcal로 환산하면 다음과 같다.

$$2.719\text{kWh} \times 860\text{Kcal} \approx 2,338\text{Kcal}$$

두 계산의 결과를 비교해 보면 온수만으로도 10시간 이상 건조기를 가동 할 수 있어야 되나 180분 동안만 온수로 가동된 것은 실험 당시 겨울철로 대기 평균온도가 1.8℃로 온수 탱크와 연결 배관에서 많은 열손실이 발생 한 것이 원인으로 추정된다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (가) 건조기를 60℃로 10시간 가동하기 위해 필요한 에너지는 2,338kcal이고 이것을 24시간 가동하기 위한 에너지로 환산하면 5,611kcal(2,338kcal×24/10)가 된다. 이 값을 기준으로 ΔT가 20℃인 경우 필요한 온수 용량을 계산하면,  $Q = CM\Delta T$ 식에 의해,  $5,611,000\text{cal} = 1\text{cal}/(\text{g}\cdot\text{C}) \cdot M \cdot 20\text{C}$ ,  $M = 280,550\text{m}\ell \approx 280\ell$ 가 된다. 즉 손실이 없다면 이 건조기를 24시간 가동하기 위해서는 280ℓ의 온수가 있으면 가능하다.
- (나) 2010년 연평균 일사량  $3,000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 를 기준으로 한다면 24시간 가동을 위해 필요한 5,611kcal의 에너지를 얻기 위해서는 약  $1.87\text{m}^2$ 의 집열면적을 갖는 PTC가 필요하다.
- (다) 또한 PCT는 직달 일사량만을 집열 할 수 있기에 집열 효율을 약 60%로 가정 하면  $1\text{m}^2$ 당 1일 집열 할 수 있는 에너지는 1,800kcal이고 5,611kcal을 집열하기 위해서는 약  $3.12\text{m}^2$ 의 집열 면적이 필요하다. 따라서 본 연구에서 제작된 PTC형 태양열집열기의 집열면적은  $4.2964\text{m}^2$ 로 1일에 7,733kcal을 집열 할 수 있어 24시간 가동을 위해 충분한 용량임을 알 수 있다.

(3) 실험에서 결과에 영향을 미칠 수 있는 요인

- (가) 실험이 겨울철에 이루어진 관계로 축열조에서의 열손실이 많이 발생하였으나, 실제 건조기가 가을철에 주로 사용됨으로 에너지 소모가 더 적을 것으로 예상된다.
- (나) 건조과정중에 습도가 올라가면 송풍기를 이용하여 강제 배기를 시켜야 되는데 본 연구에서 제작된 건조기는 건조기 벽면에 배기구를 만들어 자연 배기만 될 수 있도록 제작되어 배기에 의한 에너지 소모량을 산출하기가 어렵다.
- (다) 건조할 농산물을 투입하지 않고 실험하였으므로 실제 소요되는 에너지는 다소 증가할 것으로 예상된다.

2. 경제성 분석

크기 0.5평형 건조기를 기준으로, 1회 건조 시 약 30시간 소요되는 것으로 가정하여, 기존의 유류 사용 건조기와 본 연구에서 제작한 PTC형 태양열집열기를 이용한 축열조의 온수를 이용하는 건조기에서 년 간 소요되는 운영비를 계산하면 표 4-1과 같다. 단 각각 건조기 가동방식의 경우 송풍기를 구동하기 위한 소비전력은 동일하다고 가정하여 송풍기의 소요전력은 계산에서 제외하였다.

<표 4-1> 건조기 0.5평 기준 에너지 소요비용

유류 소비량	1.5 ℓ/h~2.5/h(평균 2 ℓ)
면세 백등유 가격	약 900원/ℓ
1회 건조시 소요 금액	2 ℓ×30시간×900원 = 54,000원
1년 운영시 소요 금액	20회 건조(예상)×54,000원 = 1,080,000원

따라서 PTC형 태양열집열기를 이용한 건조기는 대량으로 산업화가 이루어진다면, 약 300만원 정도 소요될 것으로 추정되며, 본 태양열건조 시스템을 3년 이상만 사용하면 유류건조기를 사용하는 경우에 비해 연료비용이 절감되어 태양열 건조기를 설비할 수 있는 비용이 충당됨으로 유류건조기를 사용하는 것보다 훨씬 경제적인 것으로 나타났다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 연구개발목표의 달성도

구분	연도	연구개발 목표	평가의 착안점 및 기준	달성도(%)
1차 년도	2009	PTC형 태양열 집열기, 태양추적장치, 축열조 및 차온유량제어장치 등으로 구성된 태양추적식 PTC형 태양열 집열시스템 개발 및 성능평가	PTC형 태양열 집열기 개발 및 집열효율 분석, 태양추적장치 개발 및 기능의 완전성, 축열조 개발 및 축열성능 분석, 차온유량제어장치 기능의 우수성	100
2차 년도	2010	PTC형 태양열집열기를 이용한 건조장치 개발 및 성능 평가와 경제성 분석	PTC형 태양열 집열기를 이용한 건조장치 개발 및 성능 평가, 농산물 건조특성 분석, 유류이용 건조기 대비 에너지 경제성 분석	100
최종평가		PTC형 태양열 집열기를 이용한 에너지 절약형 고효율의 태양열 농산물건조장치 개발 및 성능평가와 경제성분석	PTC형 태양열 집열기, 태양추적장치, 축열조, 건조실 등으로 구성된 태양열 건조장치 개발 및 건조장치의 성능 평가 및 에너지 경제성 분석	100

## 제 2 절 관련분야에의 기여도

### 1. 기술적 측면

- 가. 기존의 액체식 평판형 태양열집열기에 의한 토출온도(최대 70℃)를 PTC형 태양열집열기로 대체하여 토출온도를 150℃이상으로 증가시켜 이용함으로 집열기 최적 설계 시 확장성을 극대화함으로써 상대적으로 고온 및 대용량을 요하는 건조장치와 같은 농산업용 태양열시스템의 Space/Process Heating에 적용할 수 있을 것임.
- 나. 본 과제를 성공적으로 완료함으로써 본 연구의 기술개발결과를 농업이외의 전 산업 분야에 적용 할 수 있을 것임.
- 다. 본 연구 결과는 태양열을 효율적이고 중온으로 집열 할 수 있는 장치개발의 모델이 될 것임.
- 라. 본 연구는 태양열 집열효율이 우수한 PTC형 태양열집열기를 개발하여 태양열을 효율적으로 집열하여 건조장치에 이용함으로써 기존의 유류사용 열풍건조기에 비해 태양에너지를 건조기에 이용함으로 지구 온난화의 요인이 되고 있는 연소가스 발생이 없는 무공해 청정 건조장치를 개발하는 것으로 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위한 연구개발의 모델이 될 것임.

### 2. 경제·산업적 측면

- 가. 신재생에너지로서의 태양열에너지 보급률 촉진 및 유류와 가스의 수입대체 효과에 기여할 수 있음.
- 나. 유류비용의 증가로 에너지를 겪고 있는 농촌의 건조설비 열원을 위한 대체 에너지로 이용함 으로서 다소나마 농업에너지 난을 타개하는데 기여할 수 있는 모델이 될 것임.
- 다. 농업분야 뿐만 아니라 타 산업적으로 이용이 확대될 수 있어 기술적 우위로 국내 시장 점유율 증가에 의한 경제적 이익뿐만 아니라 에너지 절약의 파급 효과에 크게 기여할 수 있음.

## 제 5 장 연구개발결과의 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, 최적화 설계 Know-How(성능, 시공성 및 제조원가 측면)를 바탕으로 추후에는 저가의 산업용 건조장치로 그 용도를 극대화 할 것이며, 또한 에너지 절약형 농업시설 난방 및 가정용 난방 시스템으로도 실용화 할 것임.
2. 태양열 건조장치 개발기술을 기업체에 기술 이전함으로써 기업체의 독자적인 기술 확보 및 기업체의 주 생산기종이 될 수 있도록 추진할 것임.
3. 본 연구에 의해 개발된 태양열 집열시스템의 산업화 가능 분야는 표 1-1과 같음.

<표 1-1> 개발된 시스템의 농업적 이용 가능분야

농업 시설용 시스템	농가 가정용 시스템
농산물 태양열 건조시스템	급탕 기름보일러용 농가주택
수산물 태양열 건조시스템	가스보일러 사용 농가 주택
농업시설 난방시스템	사무실 난방 시스템

4. 본 연구개발을 통한 Pilot Plant 규모의 태양열 건조장치를 산업화시켜 1차적으로 농가에 보급할 계획임.
5. 본 기술개발에 의해 개발될 태양열 건조장치는 신기술인증 획득을 통해 국가 지원 하에 보급을 극대화 할 것임.

## 제 2 절 기술자료 및 정책자료 제공

### 1. 논문발표 및 게재: 7건

- 가. 이귀현, 김대현, 김성진. 2009. PTC형 태양열 집열 시스템의 성능분석 (Performance Analysis of Solar Collecting System Using Parabolic Trough Concentrator (PTC)). 농업생명과학원 논문집 21: 35-44.
- 나. 김대현, 이귀현. 2009. 태양열 집광형 집열기의 시뮬레이션 및 성능 분석 (Simulation and Performance Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector), 농업생명과학원 논문집 21: 17-26.
- 다. 이귀현, 김대현, 홍선일. 2010. PTC형 태양열 집열기 흡수기의 열성능 분석 (Thermal Performance Analysis for Absorber of Parabolic Trough Concentrator (PTC)). 한국농업기계학회 2010년 동계학술발표논문집 Vol. 15, No. 1: 297-304.
- 라. 김대현, 이귀현, 어승희. 2010. 태양열 집광형 집열기의 시뮬레이션 및 모델 검증 (Simulation and Model Validation of a Parabolic Trough Solar Collector), 한국농업기계학회 2010년 동계학술발표논문집 Vol. 15, No. 1: 324-327.
- 마. Bhattarai, Sujala, Sunil Hong, Gwi Hyun Lee, Dae Hyun Kim. 2010. Simulation and Model Validation of a Parabolic Trough Solar Collector for Water Heating System, 7th International AFAS Joint Symposium between Korea and Japan: 112-119.
- 바. Bhattarai, S., S. Hong, G. H. Lee, and D. H. Kim. Simulation and Model Validation of a Parabolic Trough Solar Collector. 2010. 한국태양에너지학회 2010년 추계학술대회논문집 30(2): 228-233.
- 사. 이귀현, 김대현, 홍선일, 김성진. 2011. PTC형 태양열 집열기의 성능분석 (Thermal Performance Analysis of Parabolic Trough Concentrator(PTC)). 한국농업기계학회 동계학술발표논문집 16(1): 564-571.

### 2. 특허: 2건

- 가. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 반사율을 유지하고 열손실을 줄일 수 있는 집열기  
출원일: 2010. 01. 06, 출원번호: 제 10-2010-0000930호
- 나. 특허구분: 특허, 고안의 명칭: 흡수율을 높이고 열손실을 줄일 수 있는 집열기  
흡수관, 출원일: 2010. 01. 06, 출원번호: 제 10-2010-0000931호

### 3. 향후: 논문 2건

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 태양열 집광기술

태양열 집광장치를 통하여 고온으로 집열된 태양에너지를 활용하는 응용분야는 다양한 형태의 집광방식에 따라 분류될 수 있는데, 각각의 집광방식이 가지는 특성과 한계로 인하여 획득온도 및 활용방식이 결정된다.

#### 1. 일반 집광방식

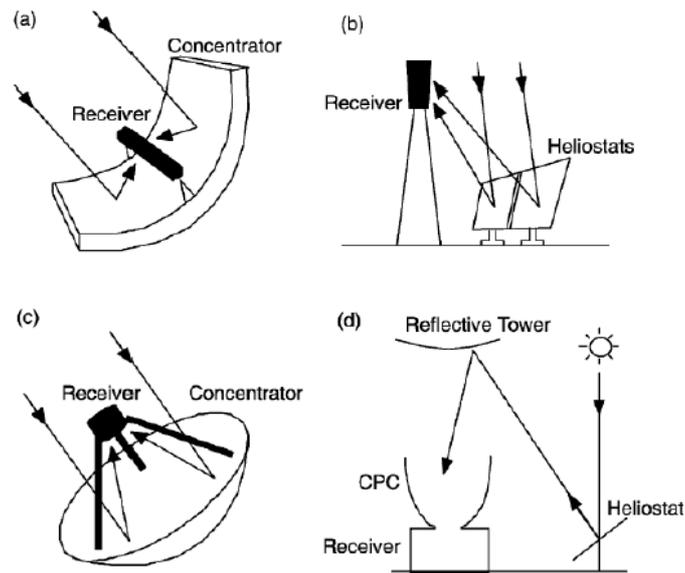
기존에 널리 사용되는 집광방식은 홈통형(PTC), 타워형(Tower), 파라볼라 접시(Dish)형 및 복합형 네 가지로 분류된다. 그림 1-1 (a)와 같이 홈통(PTC: Parabolic Trough)형 집광방식은 1축 방식의 태양추적이 가능한 파라볼라 곡면의 반사경을 통하여 300℃ 내외의 열원을 얻을 수 있는 집광장치로 주로 스팀생산을 통해 태양열 발전설비에 응용되어지는 고전적인 집광방식이다(Grasse, 1995; Karney, and Price, 1992).

중앙타워(Central Tower)형 집광방식은 개별적으로 태양을 추적하는 수백개의 반사경(Heliostat)을 이용하여 중앙의 타워(Tower)에 집광을 행하는 방식으로 홈통형 집광방식보다 높은 온도의 획득이 가능하여 대규모 발전 및 화학반응에 응용되고 있다. 그림 1-1 (b)의 파라볼라 접시형 집광방식은 작은 집열면적으로 고집광이 가능하여 스팀터빈 엔진 등을 구동하는 소규모 독립형 발전시스템에 주로 응용되고 있다. 그림 1-1 (c)의 복합형 방식은 기존의 중앙타워형 집광에 반사경을 설치하고 이를 통하여 반사된 빛을 CPC(Compound Parabolic Concentrator) 같은 2차 집광장치로 빛을 전달하여 보다 높은 초고온의 획득이 가능토록 하는 특별한 집광 형식으로 이때 CPC는 타워에 직접 설치될 수도 있다(그림 1-1 (d)).

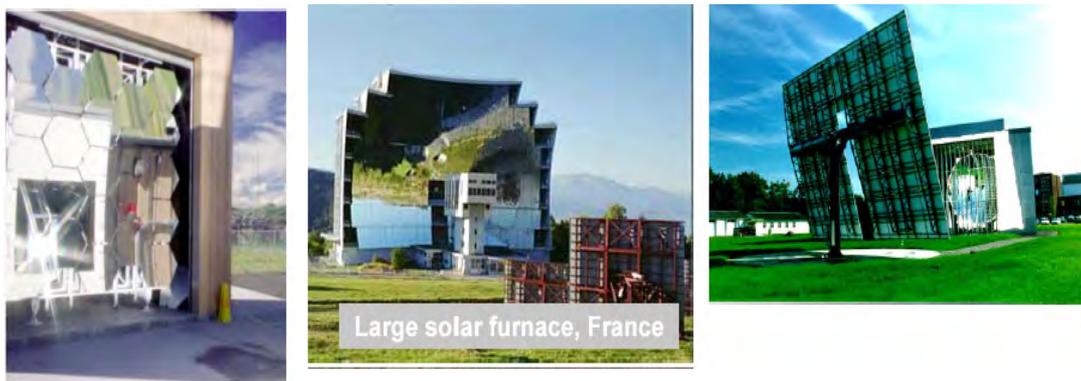
#### 2. 고집광과 초고온 태양로

일반적으로 초고온 태양로라고 하면 기존의 파라볼라 접시형 반사경 혹은 타워형 집광설비에 CPC 형태의 2차 집광시스템을 추가로 설치하여 수천 K에 이르는 초고온을 얻을 수 있는 장치를 의미한다. 1,000~수천 K에 이르는 고온의 획득이 가능한 초고온 태양에너지 집광 설비는 기존의 태양열 발전이 아닌 화학반응을 통해 보다 유용한 에너지의 획득이 가능한 첨단 설비가 된다고 할 수 있다(그림 1-2). 고온으로 집열된 고집광 태양에너지를 활용하여 화학반응을 수행할 경우 복사 에너지를 효과적으로 활용해야 하는 관계로 화학반응 시스템의 구조는 기존의 방식과 다른 형상을 필요로 하게 되는데, 이에 따라 반응기의 형상, 열전달, 촉매의 적용 등 핵

심 요소기술도 기존의 것과는 다른 방식으로 응용되어야 한다. 그러나 1,000K 이상의 초고온 태양열 화학반응을 응용하는 고집광 태양에너지의 활용을 위한 반응기는 효과적인 열전달을 위해 반응물과 집광된 태양 에너지가 window를 사이에 두고 직접 접촉하는 형태를 가지고 있다. 세계적으로 초고온 태양열화학반응기들은 작동의 개념과 특성에 따라 회전 캐비티형 반응기, 와류 캐비티형반응기, 2-캐비티형 반응기로 명명하고 있으며, 2,000K 이상의 초고온에서 태양연료생산을 위한 화학반응을 수행할 수 있다.



<그림 1-1> 태양광 집광 방식에 따른 분류(에너지관리공단, 2008).



<그림 1-2> 초고온 태양로 실험설비(미국, 프랑스, 스위스) (에너지관리공단, 2008).

## 제 2 절 태양추적 기술

### 1. 태양 추적의 필요성

태양열 집열기는 지구로 복사되는 태양에너지를 집열하여 이를 작동유체에 전달시키는 역할을 담당하고 있는 태양열 이용시스템에서의 중요한 부분이다. 태양열 집열기의 집열성능은 전체 태양열 이용 시스템의 효율을 결정하며, 일반적으로 태양열 이용 시스템의 효율은 태양열 집열기기가 보다 많은 태양에너지를 집열할 때 상승한다. 따라서 지구로 도달되는 태양에너지의 최대량을 집열하기 위해서는 태양 추적 장치가 필수적이라 할 수 있다.

태양열 집열기의 에너지 집열량은 집열기의 설치조건에 따라서 크게 달라진다. 집열기로 입사되는 태양광선이 집열면에 수직으로 입사되지 못할 경우, 이로 인하여 발생하는 코사인 손실(cosine losses)의 양이 달라지기 때문이며, 집열기는 이와 같은 코사인 손실을 최소화하도록 설치되어야 한다. 태양추적기시스템은 코사인 손실을 최소화하기 위하여, 태양열 집열기에 탑재되는 시스템이다. 즉 태양추적시스템은 변화하는 태양의 위치에 따라 태양열 집열기의 집열면을 항상 태양을 향하도록 함으로서, 태양열 집열기의 집열면이 입사되는 태양광선에 수직으로 놓여있지 않음으로 인하여 발생하는 손실을 최소화시키고, 따라서 보다 많은 태양에너지를 집열시킬 수 있도록 하는 시스템이다.

### 2. 태양 추적기술

집광형 집열기의 흡수관에 집광된 빛이 계속 쪼이게 하기 위해서는 한쪽을 고정시킨 상태에서 동-서 또는 남-북 방향으로 한 축을 따라 태양을 추적하여야 한다. 이러한 태양 추적기의 형태에는 utilized-shadow-band(aperture-based)추적기와 flux-line 추적기 2가지가 있다. Shadow-band 태양 추적기는 집광부에 설치되는데 두 개의 센서가 양측으로 나뉘어져 shadow band 로 가려진 형태로 되어 있다. 시스템이 태양의 위치와 어긋나 있을 때에는 두개의 센서중 하나에 빛이 감지되고 빛이 감지된 방향으로 시스템을 움직인다. 집열기가 정확히 추적이 되면 shadow band의 양 센서는 똑같이 그늘이 지게 되고, 양 센서의 출력기신호는 균형을 이루게 된다. Flux-line 태양 추적기는 센서들은 흡수부의 집광 복사율을 추적하기 위하여 흡수부의 양 측면에 설치된다. 집열기의 양측 센서에 똑같이 조사됐을 때가 정확히 추적이 이루어진 것이고, 두 형태 모두 정확한 태양 추적을 위해서는 센서의 설치 위치가 중요하다. 현재 개발된 PTC용 태양추적장치의 추적성능 검증을 위한 실험이 현재 진행되고 있으며, 추적 정밀도를 향상시키기 위한 인공지능형 제어 알고리즘 및 급격한 주변 환경의 변화로부터 시스템을 보호하기 위한 시스템 보호기능의 개발이 진행되고 있다.

## 제 3 절 축열기술

축열 방법은 다양하므로 그 분류 방법에는 관점에 따라 여러 가지가 있을 수 있다. 가장 쉬운 방법으로는 에너지의 저장 온도에 따른 분류를 들 수 있으며, 평판형 집열기를 사용하는 태양열 난방 등 100~500℃ 또는 500℃ 이상의 중온 및 고온 저장 등으로 나누는 것이 이에 해당된다. 또 에너지의 저장 기간에 따라 단기 저장과 장기 저장으로 분류 하는 수도 있으며, 보통의 태양열 냉난방 시스템에서는 2~3일 동안의 정장은 단기저장, 하절기의 태양열을 지하의 대수층에 저장한 후 동절기에 사용하는 것이 장기저장이라 할 수 있을 것이다. 그러나 축열 방법을 분류하는 가장 일반적인 방법은 역시 저장하는 에너지의 형태에 따른 분류라고 할 수 있으며, 대표적인 에너지의 저장 형태로는 열저장, 전기저장, 기계적 저장, 화학적 저장 등을 들 수 있다.

### 1. 현열 이용

현열을 이용한 열저장은 태양열 냉난방에 가장 보편적으로 적용되는 방법의 하나이며, 이는 축열 매체의 온도 변화에 따른 열의 저장 및 방열 능력을 이용한 것이다. 현열을 이용한 태양열의 저장 방법은 축열 매체의 종류에 따라 액체식과 고체식으로 분류 하거나 혹은 저장 온도에 따라 저온과 고온 저장으로 분류 할 수도 있다. 일반적으로 평판형 액체식 또는 공기식 집열기를 사용하는 태양열 난방 시스템에는 100℃ 이하의 저온 저장이 이용되며, 집광형 집열기를 이용한 고온의 집열에는 고온 저장이 필요하다. 현열을 이용한 여러 액체 축열 매체로는 물, 다우샘, 프로필렌 그리콜 등이 있으며, 일반적인 태양열 난방이 100℃ 이하의 온수로 작동됨을 감안하여 역시 물이 가장 경제적인 축열 매체이다. 100℃ 이상의 산업 공정열 이용 등의 축열을 위해서는 물 이외에 잠열재 등 여러 매체가 이용 가능하다. 일반 가정의 태양열 난방 시스템의 축열에는 잠열보다는 현열이 이용되는데, 그 이유는 현열 이용이 잠열 이용에 비해 상대적으로 큰 축열조를 필요로 하고 저장 온도도 일정하지 못한 단점이 있기는 하나, 값이 싸고 수명이 길다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

### 2. 잠열 이용

잠열이란 물질의 상이 변화할 때 동온에서 흡수, 방출되는 열로서, 얼음이 녹을 때 흡수하는 80cal/g의 용해열이나 물이 증발할 때 흡수하는 540cal/g의 증발열 등을 대표적인 예로서 들 수 있다. 현재까지 태양 에너지 응용 분야에서 사용하고 있는 PCM은 크게 파라핀 왁스 같은 유기물과, 망초나 염화칼슘 6수화물 등의 무기수화염으로 나눌 수 있다. 좀더 고온을 요구하는 경우에는 불화물(fluoride)이나 금속의 합금 등을 이용할 수도 있으나, 아직까지는 실용화된 예를 찾기가 힘들고 주로 연구 및 개발 단계에 머물러 있다. 축열(thermal energy storage : TES)의 관점에서 볼 때 상변

화 물질이 당위 부피당 가지는 잠열은 사용 가능한 온도 범위 내에서 가질 수 있는 현열에 비하여 대단히 크다. 따라서 열에너지 저장에 필요한 공간이 절약될 뿐만 아니라, 일정한 온도에서 열을 흡수 방출하므로 과열 현상을 막아 외부로의 열 손실을 줄이고, 열전달 시스템을 적절히 설계함으로써 온도 제어 장치 없이 시스템의 온도를 거의 일정하게 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 실용화된 PCM은 대부분이 PCM 물질뿐만 아니라 PCM 용기(incapsulation)와 시스템을 동시에 고려한 개념이다. 즉, PCM 자체는 주어진 온도와 열의 공급 방출 등에 의하여 상을 변화 할 수는 있으나, 열매체와의 열교환 및 열에너지를 효과적으로 이용하고, 이를 지속적으로 사용하기 위해서는 적절한 PCM 용기 개발 및 사용 방법이 물질과 전체 시스템의 열 수지에 따라 개발되어야 한다. 실제로 현재까지 PCM을 이용한 TES 및 PCM의 신뢰성과 이에 따른 실용성에 대하여는 많은 논쟁이 있어 왔으며, 과냉의 크기, 가역성, 부식성, 화학적 안정성 및 제품 원가 등의 여러 가지 인자들 때문에 PCM을 널리 사용하고 있지는 못한 실정이다. 앞서서도 지적되었듯이 잠열 축열(열저장 및 방열) 시스템 설계는 잠열 저장재와 독립적으로 이루어지는 것이 아니라, 각 잠열 저장재 마다 가지는 상평형, 결정화 속도 및 열전달 특성이 동시에 고려되어야 한다. 즉, 상평형 온도가 같다고 하더라도 유기 잠열재와 무기수화염은 우선 용기가 다르고, 결정화 혹은 고화 속도가 다르며, 용기 내부에서의 자연 대류 특성이 서로 다르므로 시스템 디자인이 서로 다를 수밖에 없으며, 아직까지는 어떠한 물질에 대하여 어떠한 방법이 최적이라고 할 수 있을 정도로 연구가 되어 있지는 못하다. 지금까지 개발된 잠열 축열에서는 주로 PCM을 관형 또는 구형의 용기나 선반 등에 놓고, 공기나 물 등의 열매체를 용기 밖으로 흘리든지, PCM을 저장고에 넣고 코일을 통하여 열매체를 순환시키는 방법을 사용하고 있다. 특히 공기가 열매체인 경우에는 용기를 사용하는 전자의 방법을, 물 등의 액체가 열매체인 경우에는 후자의 방법이 일반적이다. 축열장치는 크게 관상형과 캡슐형으로 나눌 수 있으며 히트 파이프(heat pipe)의 이용, Moving scraper 이용, 직접 접촉식, 회전형 축열법 등의 특이한 방법도 있으나 특별한 경우에만 적용되는 경우가 대부분이다. 시스템 비용은 PCM 자체보다도 PCM용기를 만드는데 더 많이 소요되며, 대개의 경우 PCM 값이 8~10배 정도까지로 추산되고 있다.

### 3. 화학 반응열 이용

화학반응열을 이용한 축열 및 방열 기술은 현열 및 잠열을 이용하는 것에 비해 축열 밀도가 크며 보온이 필요 없이 장기간 열저장이 가능하다는 장점이 있다. 특히 이용 가치가 적은 낮은 온도를 승온(chemical heat pump)하는 것이 가능하므로 현재 여러 방면으로 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이 축열 방식이 현열 및 잠열을 이용하는 것과 근본적으로 다른 점은 화학 평형이 존재한다는 점이다 이 평형 관계에 대해서는 물리 화학, 반응 공학, 열역학 등 기존 대학 교재에서 잘 설명되고 있다, 또 이용 형태는 폐쇄계(closed system) 및 개방계(opened system)로 대별되며, 앞의 경우 방열 과

정은 가압을, 축열과정은 감압(reduced pressure)을 함으로써 승온 효과, 즉 heat pump의 효과를 얻을 수 있다. 한편 뒤의 경우 최대 승온이 가능한 온도는 대기압(1 atm)의 평형온도 이하가 된다. 화학반응열을 실제 적용하려고 할 때에는 태양열을 이용할 수 있는 온도 범위를 고려하여 최적의 반응계를 선택하여야 한다. 축열재의 선택은 곧 반응계의 선택과 같으므로 축열 온도 및 축열 용량, 축열 및 방열 속도, 축열 물질의 취급상의 문제 등에 특히 유의해야 한다. 반응의 평형 온도, 반응열 등에 대하여 열역학적인 검토로 어느 정도의 예비지식을 얻을 수 있으며, 화학 반응에 대한 반응 속도론적 검토 및 열전달의 속도론적 검토가 필요하며, 축열장치의 설계 및 운전에 매우 중요하므로 실험을 통한 데이터 수집이 필요하다. 또한 축열 물질의 안정성 및 가격 등의 문제는 물론이며, 반응 물질 간의 접촉 또는 분리를 어떻게 할 것인가에 대한 연구가 매우 중요하므로 이를 축열 시스템에 잘 적용 할 수 있도록 해야 한다.

## 제 7 장 참고문헌

- 1 고흥군 외 6명. 1996년. 農産加功機械學
- 2 변유량 외 13명. 2003년. 현대 식품공학
- 3 통계청. 2006년. 농업총조사보고서
- 4 Bakos, G. C., I. Ioannidis, N. F. Tsagas, I. Seftelis. 2000. Design, optimisation and conversion-efficiency determination of a line-focus parabolic-trough solar-collector (PTC), *Applied Energy* 68: 43-50.
- 5 Chung, J. M., T. B. Seo, and Y. H. Kang. 2000. Conjugate heat transfer for circular absorber in parabolic trough concentrator. *Solar energy* 20: 81-89.
- 6 Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, USA.
- 7 Edenburn, M. W. 1976. Performance analysis of a cylindrical parabolic focusing collector and comparison with experimental results. *Solar Energy* 18: 437-444.
- 8 Eskin, N. 1988. Transient performance analysis of cylindrical parabolic concentrating collectors and comparison with experimental results, *Energy Conversion & Management* 40: 175-191.
- 9 Garcia-Rodriguez, L. and C. Gomez-Camacho. 1999. Thermodynamic analysis of a solar parabolic trough collector distillation plant. *Desalination* 122: 215-224.
- 10 Garcia-Rodriguez, L., A. I. Palmero-Marrero, and C. Gomez-Camacho. 1999. Application of direct steam generation into a solar parabolic trough collector to multieffect distillation. *Desalination* 125 : 139-145.
- 11 Grasse, W. 1995. *Solar PACES Annual Report*. DLR Germany.
- 12 Henderson, S. M. and R. L. Perry. 1976. *Agricultural Process Engineering*. AVI Publishing Co., Inc., Westport, CT.
- 13 Howell, J. R., R. B. Bannerot and G. C. Vliet. 1982. *Solar-Thermal Energy Systems*. McGraw-Hill, New York, USA.
- 14 Kalogirou, S. 1998. Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination. *Applied Energy* 60: 65-88.
- 15 Kalogirou, S., S. Lloyd, and J. Ward. 1997. Modeling, optimization, and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system. *Solar Energy* 60: 49-59.
- 16 Kalogirou, S., S. Lloyd, J. Ward, and P. Eleftheriou. 1994. Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system. *Applied Energy* 47: 341-354.

17. Kang, Y. H., H. Y. Kwak, H. K. yoon, C. K. Yoo, D. G. Lee, and T. B. Seo. 2000. Determination of the optimal PTC receiver diameter considering heat losses. *Solar Energy* 20 : 73-80.
18. Kearney, D. W. and H. W. Price. 1992. Solar thermal plants-LUZ concept (current status of the SEGS plants). *Proceedings of the Second Renewable Energy Congress*. Reading UK 2: 582-588.
19. Kim, D. H., B. M. Jenkins, T. R. Rumsey, M. W. Yore, N. J. Kim, 2007. Simulation and model validation of a horizontal shallow basin solar concentrator. *Solar Energy* 81: 463-475.
20. Kwak, H. Y., H. K. Yoon, C. K. Yu, Y. H. Kang, H. S. Jeon, and K. Y. Han. 1996. A study on thermal performance of parabolic trough concentrating collector. *Solar Energy* 16 : 5-10.
21. Lee, G. H, W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. Thin-layer drying characteristics of chicory root slices. *Transactions of the ASAE* 47(5): 1619-1624.
22. Stone, R. J., 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy* 51(4): 289-291.
23. Tuma, M., J. Oman, and M. Sekavcnik. 1999. Efficiency of a combined gas-steam process. *Energy Conversion and Management* 40: 1163-1175.
24. You, Y. and E. J. Hu. 2002. A medium-temperature solar thermal power system and its efficiency optimization. *Applied Thermal Engineering* 22: 357-364.