

## 태양열 물펌프의 운전 자동화 설계

김영복 · 손재길\* · 이승규 · 김성태 · 이양근\*\*

경상대학교 농업생명과학대학 농업시스템공학부, 농업생명과학연구원, NURI

## Design of the Condenser and Automation of a Solar Powered Water Pump

Kim, Y. B., Son, J. G.,\* Lee, S. K., Kim, S. T. and Lee, Y. K.\*\*

Division of Agricultural Systems Engineering, Institute of Agriculture and Life sciences, NURI, Gyeongsang National University, 900 Gazwadong, Chinju city, 660-701, Korea.

### Summary

The solar powered water pump is very ideal equipment because solar power is more intensive when the water is more needed in summer and it is very helpful in the rural area, in which the electrical power is not available. The average solar radiation energy is 3.488 kWh/(m<sup>2</sup> · day) in Korea. In this study, the automatic control logic and system of the water pump driven by the radiation energy were studied, designed, assembled, tested and analyzed for realizing the solar powered water pump. The experimental system was operated automatically and the cycle was continued. The average quantity of the water pumped per cycle was about 5,320 cc. The cycle time was about 4.9 minutes. The thermal efficiency of the system was about 0.030 %. The pressure level of the n-pentane vapour in flash tank was 150 ~ 450 hPa(gauge) which was set by the computer program for the control of the vapour supply. The pressure in the condenser and air tank during cycles was maintained as about 600 hPa and 1,200 hPa respectively. The water could be pumped by the amount of 128 kg/(m<sup>2</sup> · day) with the efficiency of 0.1 % and the pumping head of 10 m for the average solar energy in Korea.

(Key words : Solar energy, Water pump, Automatic operation, Thermal efficiency, Phase change material)

### 서 론

계와 환경과의 친화성문제로 인해 자연에너지와 같은 청정에너지로 대체하고자 하는 노력이 계속되어 왔다. 자연에너지로서 태양에너지를 이용한 화석에너지는 그 자원의 한

이 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업의 논문입니다.

\* 덴소풍성(주)(Denso PS Electronics Corp.)

\*\* 상주대학교 기계공학부(Division of Machinery, Sangju National University)

Corresponding Author : Kim, Young-bok, Major in Bio-Industrial Machinery Engineering, Division of Agricultural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Institute of Agriculture and Life Sciences, NURI, Gyeongsang National University, Gazwa-dong, Jinju city, Gyeongnam province, 660-701, Republic of Korea. E-mail : youngkim@nongae.gsnu.ac.kr

너지는 그 자원이 무한하고 쉽게 접근할 수 있는 장점이 있고 그 응용의 일환으로서 태양열 물펌프에 대한 연구가 진행되어 왔다. 태양열 물펌프는 엔진을 사용하지 않고도 물을 양수할 수 있을 뿐만 아니라 전기모터를 사용할 수 없는 농촌에서 특히 유리하다. 더구나 물 요구가 많은 여름철에 그 동력원인 태양에너지 공급이 풍부하니 이상적인 장치라 할 수 있다.

태양열 물펌프의 형태는 태양열을 동력으로 변환하는 방법에 따라 터빈 구동방식, 태양전지모터방식, 노즐흡입방식, 공기팽창방식, 저온상변화작동물질방식 등 여러 가지 방법이 있으나(김, 2004), 장치의 단순성과 비용, 효율 등을 고려하여 최근 저온상변화물질을 작동물질로 한 장치가 많이 연구 발표되고 있다. 저온상변화물질을 작동물질로 한 태양열 물펌프는 저온에서 액체-기체 상변화 하는 작동물질을 이용하여 태양열을 받아 액체에서 기체로 기화 팽창하는 힘을 이용하여 물을 밀어내어 위로 배출하고, 작동물질이 공기나 물과 같은 저온열원에 의해 냉각되어 응축 액화하면서 생기는 압력강하를 이용하여 물을 흡입하여 끌어올리는 작용을 하는 방법이다. 이 방법에는 Rao 등(1990)에 의한 n-pentane을 이용한 실험연구가 있는데 열효율이 낮고 예측치와 실측치의 오차가 매우 크다고 하였으며, 이를 개선하기 위해 작동유체의 온도와 압력을 제한하고 물펌프 용기의 크기를 적절하게 조절함으로써 성능향상을 도모하였다. Sumathy(1999)는 1 m<sup>2</sup>의 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 펜탄을 이용하였으며, 양정의 수준에 따른 펌프구동 사이클을 분석하였고, 전체적인 열효율은 0.12~0.14%를 나타낸다고 하였다. Wong 등(2000)은 1 m<sup>2</sup>의 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 에틸에테르를 이용하였으며, 양정 6~10 m일 때 하루 700~1400 l/day의 물을 양

수할 수 있다고 하였고, 이것은 열효율 0.42~0.34%에 상당한다고 하였다. Al-Haddad 등(1996)은 CFC11의 상변화를 이용한 물펌프에서 응축기와 증발기가 별도로 설치된 경우의 수학적 모델을 개발하여 펌프효율을 예측하고 실측값과 비교한 결과 비교적 잘 일치함을 확인하였다. Sudhakar 등(1980)은 개량된 태양열 물펌프를 만들었는데 물과 작동유체 사이의 접촉면적을 플로우트를 이용하여 감소시킴으로서 열효율을 높이려 하였고, 이때 작동물질은 부탄, 혹은, CFC 11을 이용하였다.

그런데 이러한 저온상변화물질을 이용한 태양열 물펌프에 있어서 중요한 점은 응축기의 성능과 사이클의 반복문제이다. 다시 말하면 태양열 물펌프를 열 역학적으로 보면 태양열 에너지를 물의 위치에너지로 변환시키는 엔진에 해당하는데 고열원인 태양에너지는 지역별 태양강도와 집열기의 면적에 의해 결정 공급될 수 있으나 저열원인 작동물질 냉각열원은 확보하기가 쉽지 않은 것이다. 공기는 비열이 작아서 어렵기 때문에 대개는 양수한 물을 응축기로 통과시켜 작동물질을 냉각하는 저열원으로 이용하고 그 이후에 필요한 용도로 사용한다. 사이클을 반복하기 위해서는 작동물질증기를 발생시켜 설계된 시점에 공급해 주어야 하며, 작동물질을 적절하게 응축시키기 위해 저열원의 온도가 낮거나 응축기에서 충분한 전열면적을 확보하여야 하며, 증기발생부에서 응축기로 넘어온 작동물질을 다시 증기발생부로 이동시키는 방법도 도입되어야 지속적인 사이클이 구성될 수 있다.

한편, 태양열 물펌프의 고열원에 상당하는 태양에너지의 강도는 지역별·계절별로 다르다. 한국의 전국적인 태양열 일사량을 일년 평균치로 계산하면 서울을 제외하고는 전국이 하루 약 3.488 kWh/m<sup>2</sup>day 정도의 일사 에너지를 받고 있는 것으로 보고되고 있으며(한국태양에너지학회, 1991), 2000년 우리나라

라 지역의 평균 연간 총 일조시간은 약 2,112 시간(기상청홈페이지, 2002), 하루 평균 일조시간은 5.786 시간으로 나타났다. 이 평균 일조시간을 기준으로 평균 태양강도를 계산하면 약  $0.6 \text{ kW/m}^2$ 이 된다. 전국 하루 평균  $3.488 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ 의 태양에너지를 일로 변환하되 종합적인 에너지 변환효율을 약 0.3%, 양정 10m로 보면 단위면적  $\text{m}^2$  당 약 380 kg의 물을 양수할 수 있게 된다. 저열원에 상당하는 지하수의 온도를 살펴보면, 우리나라의 지하수온도는 지역별로 약간의 차이는 있으나 대개  $12 \sim 17 \text{ }^\circ\text{C}$  정도이며, 지리적인 변수와의 관계를 이용해 그 지역의 지하수온도  $T_m$ 는 다음과 같이 구할 수 있다(김, 2000). 아래 방정식에서 다중상관계수는 0.958로서 특히 위도와 해발에 고도로 유의한 것으로 분석되었다.

$$T_m = 50.049 - 0.849X_1 - 0.03131X_2 - 0.00622X_3, \dots\dots\dots (1)$$

단,  $X_1 = \text{위도}$ ,  $X_2 = \text{경도}$ ,  $X_3 = \text{해발(m)}$

태양에너지를 이용한 물펌프를 실현하기 위해서는 양수 사이클이 원활하게 반복되어야 하는데 이때 가장 중요하고 설계가 까다로운 요소는 응축기부분으로서 진공의 문제나 해석의 문제, 장치각부의 크기설계 등의 면에서 상당한 주의가 요구된다. 또한 작동물질이 기화와 액화를 반복하며 이동되는 시점을 정확하게 제어하고 순환경로를 확보해야 한다.

따라서 본 연구에서는 태양열 물펌프의 반복 사이클을 확보하기 위해 장치구성요소 중 가장 중요하고 애로요인인 응축기부분에 대한 최적설계로서 시스템 용량에 대응한 전열면적을 결정하고, 작동물질의 이동을 제어하기 위한 자동제어논리를 개발하였으며, 이와 관련한 실험을 실시하고 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 자동화 장치

#### 가. 장치의 개요

실험장치의 구성회로와 입체배치도, 사진은 각각 그림 1, 2, 사진 1에 나타낸 바와 같다.

사진 1에 나타난 장치에는 단열이 되어있지 않으나 실험 시에는 장치의 열손실을 줄이기 위하여 각 탱크 외부에는 40 mm 두께의 토이론 단열을 실시하였다. 장치를 구성하는 각 탱크들은 서로 그 크기 간에 연관되어 있는데(김, 2003), 본 장치에서는 작동조건의 규명을 위한 수준의 조절 등 실험의 목적상 표 1과 같은 크기로 제작하였다. 장치의 탱크는 전부 두께 10 mm의 투명아크릴로 하여 강도를 확보하면서 내부를 관찰할 수 있도록 하였다. 작동물질의 가열부는 태양열 공급의 불균일성을 극복하기 위하여, 실험시간의 단축과 운전변수의 수준에 따른 장치특성을 명확하게 규명하기 위하여 태양열 집열기에 상당하는 복사가열장치를 제작하여 실험하였다. 장치의 효율에 영향을 미치는 여러 요인 중 중요한 것은 물탱크 W 내에서 작동물질증기가 탱크내의 물에 냉각 응축되어 수위상단에 뜨게 되는 현상으로서 이것은 작동물질이 하는 일을 줄이게 되고 설계된 물탱크의 크기와 물 피스톤의 크기를 벗어나게 하는 요인이 되므로 가능한 한 물탱크 내 응축은 적은 것이 좋다. 실제 물탱크 내 작동물질의 응축은 기존의 연구(김, 2003)와 예비실험에서 많이 관측되었으며, 이를 방지하기 위하여 본 장치에서는 내부단열(Sudhakar, 1980)을 하였다. 이것은 탱크 내 물의 상단에 작동물질과 화학반응하지 않는 코르크와 같은 물질로 된 원판을 넣어서 물 피스톤과 함께 움직이도록 하는 것으로서 물 피스톤과 상단의

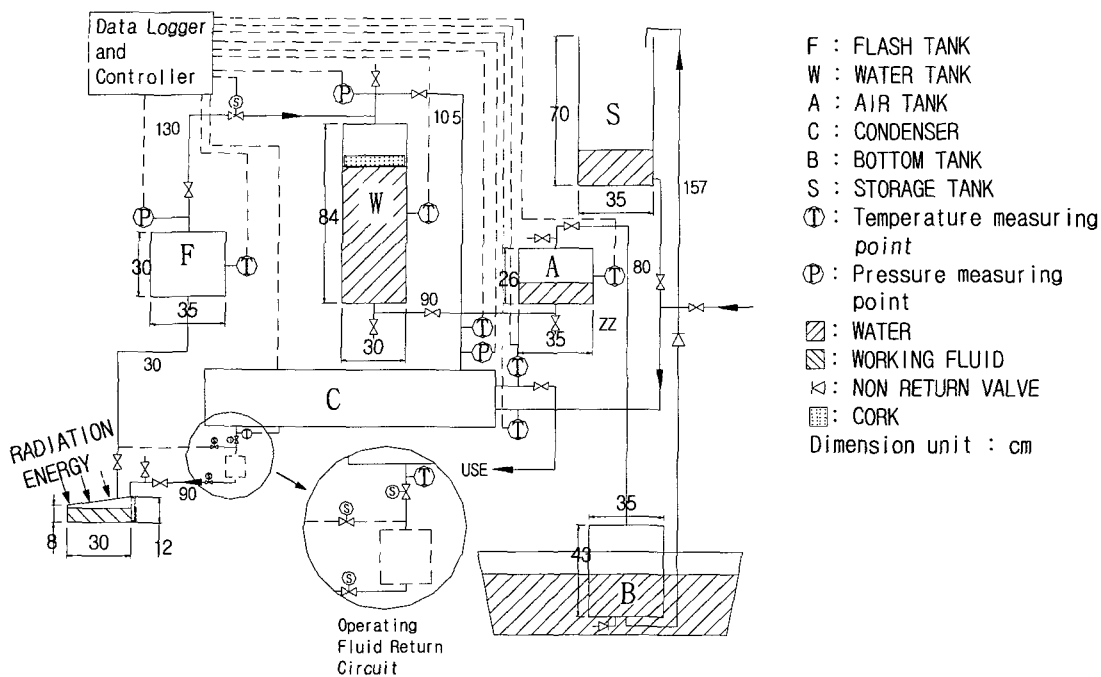


Fig. 1. System diagram for automation of operating.

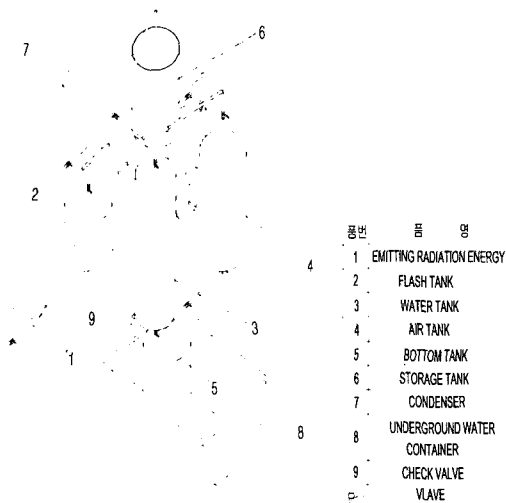
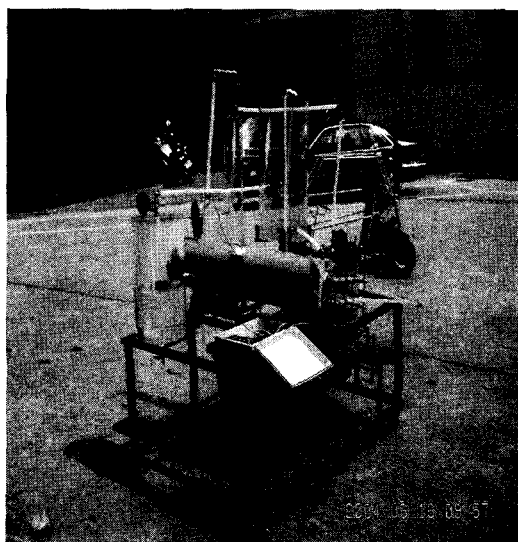


Fig. 2. Experimental system.



Picture 1. View of the second experimental system.

작동물질증기와의 접촉면적을 줄여 전열을 줄이게 된다. 응축기는 원통 다관형으로서 동체 외경 267.4 mm, 동체길이 1,358 mm, 내

부 관직경 20 mm, 본당길이 1.204 m, 사용 총 동관수 36개로서 총 전열면적 8.34 m<sup>2</sup>, 전 열계수 약 1 kW/(K · m<sup>2</sup>) 이었다.

Table 1. Dimension of the experimental system

Element	Inner diameter(mm)	Outer diameter(mm)	Thickness (mm)	Height/ Length(mm)	Volume (cc)
Flash tank	350	350	10	300	23936
Water tank	300	300	10	840	50466
Air tank	350	350	10	260	20517
Bottom tank	350	350	10	430	35049
Storage tank	350	350	10	700	58131
F-W line	20	20	2	1300	331
W-A line	20	20	2	900	229
A-B line	20	20	2	1650	420
B-S line	20	20	2	1570	399
Pentane container	width:600 depth:300 height(S):80 height(L):120 thickness:3				16678

나. 자동화 회로 및 측정부

사이클을 반복하여 연속적으로 자동양수하기 위해서는 그 과정을 자동화하여야 한다. 사이클을 자동으로 반복하게 하려면 각 부의 온도를 기준으로 하거나 압력을 기준으로 하거나 물높이의 위치를 기준으로 신호를 받아 밸브를 제어할 수 있을 것이다. 여기서는 증기물탱크내의 압력을 기준으로 자동화 하였다. 그것은 증기물탱크 내부의 하단에 압력 센서를 설치하여 그 상단의 물높이가 배출과 흡입과정에서 변하는 것을 수두압력으로 변환, 전기신호로 읽어 들여 전자밸브를 제어하는 것이다. 이를 위하여 증기물탱크 하단에 -5000~5000 mmH<sub>2</sub>O gauge 범위의 압력 변환센서를 설치하여 변환된 0~5 V 범위의 전기신호를 전압강하모듈을 이용하여 0~2.5 V로 강하시켜 제어장치에 입력, 전자밸브를 제어하도록 하였다. 압력센서에 의해 읽어 들인 전압 V(mV)와 디지털압력계 압력 P(hPa)와의 관계는  $P=0.8708V + 0.7017$  ( $R^2=0.9999$ )로 나타났다. 측정과 관련한 각부의 사양은 표 2에 나타낸 바와 같다. 온도, 압력을 읽어 들이고 솔레노이드밸브를 구동시키는 회로도

는 그림 1과 같으며, 응축기에 들어있는 작동물질을 야간에 회수하는 회로를 그림에 나타내었다. 그림에서 응축기 하단의 회로는 응축기에서 응축된 작동물질을 회수하는 회로이다. 제어프로그램은 컴퓨터에서 측정부 센서에 대한 내역과 환산프로그램, 출력신호를 내기 위한 기준값, 기록시간 등을 포함하여 작성하고, 이를 제어장치인 데이터로그에 옮겨 넣음으로서 데이터로그에서 셋팅된 압력이 되면 전자밸브를 열도록 명령하여 구동되도록 하였으며, 기록된 측정값들은 컴퓨터에서 받아들여 해석하였다.

시스템의 효율과 장치운전특성을 알아보기 위해서는 운전과정에서의 경과시간에 따라 각부 온도, 압력, 양수량, 작동물질을 비롯한 유체들의 체적, 전력량, 작동물질 소요량, 펜탄소요량 등을 측정하여 효율계산과 같은 필요한 계산을 하게 된다. 작동물질과 물, 공기의 각 시각마다의 체적을 계산하기 위해서는 각 탱크에 높이별로 위치눈금을 붙이고 단열부에 높이 관측창을 만들어 측정하였으며, 복사가열부의 펜탄량은 사이폰 튜브를 연결하여 그 량을 측정하였다. 전력량은 적산전력계를, 온도는 T 타입 열전대온도센서를 사

Table 2. Specification of the measuring parts

Items	Description
Data Logger and control system	Campbell scientific, Inc., Model : CR10x Control input/output 8 channels Relay multiplexer AM416(32 channels)
Solenoid valve	Type : Normal open AC 200/220 V, 50/60 Hz, Rc PT 1/2, Inner Dia. 15 mm
Relay	Wonder SSR WK-1210SQ(Wonkwang Inc.) Input : 4-32 VDC, Output : 240 VAC, 10A
Pressure gauge	Absolute pressure : testo 511 0-1100 hPa Gauge pressure : testo 0-1000, 0-2000 hPa
Pressure sensor unit	Pressure range : -5000~5000 mmH <sub>2</sub> O.gauge Type model : Piezoresistive ceramic sensor, WISESENTROL Output : 0~5 V Voltage divider : Campbell, 0~5 V → 0~2.5 V
Temperature sensor	T type thermocouple $\phi$ 3.2 mm
Electricity meter	220V, 40(10)A, 60Hz, 1.0 Wh/pulse, Single phase Omnisystem Corp.

용하여 데이터로그에 1분 간격으로 저장 측정하였으며, 압력은 응축기내의 진공압력을 포함하여 각부 압력을 디지털압력계로 측정하였다.

## 2. 자동제어논리

자동화에서의 사이클 제어 과정을 살펴보면 그림 3과 같다. 태양열이 공급되면 작동물질이 기화하여 기액 분리탱크 내에 증기가 차게 되고 압력이 상승하게 된다. 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 연결밸브를 개방하면 작동물질 증기가 증기물탱크로 밀고 들어가서 양수에 필요한 압력에 도달하면 물을 아래로 밀어붙여 연결된 공기물탱크와 배관을 통하여 물을 양수하게 된다. 하강을 계속

하여 증기물탱크내의 수위가 설정된 최 하단 위치에 도달하면 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 닫고 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 열어서 증기물탱크 속의 증기를 냉각시킨다. 냉각이 진행되어 증기물탱크 내 진공이 형성되어 수위가 설정된 최 상단 위치에 이르면 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 닫고 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 열어서 다음 단계의 사이클을 다시 시작하도록 한다. 응축기내에서 응축된 작동물질을 회수하는 방법은 응축기 하단의 응축작동물질 집적탱크 상단의 밸브를 닫고 집적탱크의 좌측과 하단탱크를 열어 작동물질 가열부와 압력평형을 만들어 작동물질을 가열부로 되돌리게 한다.

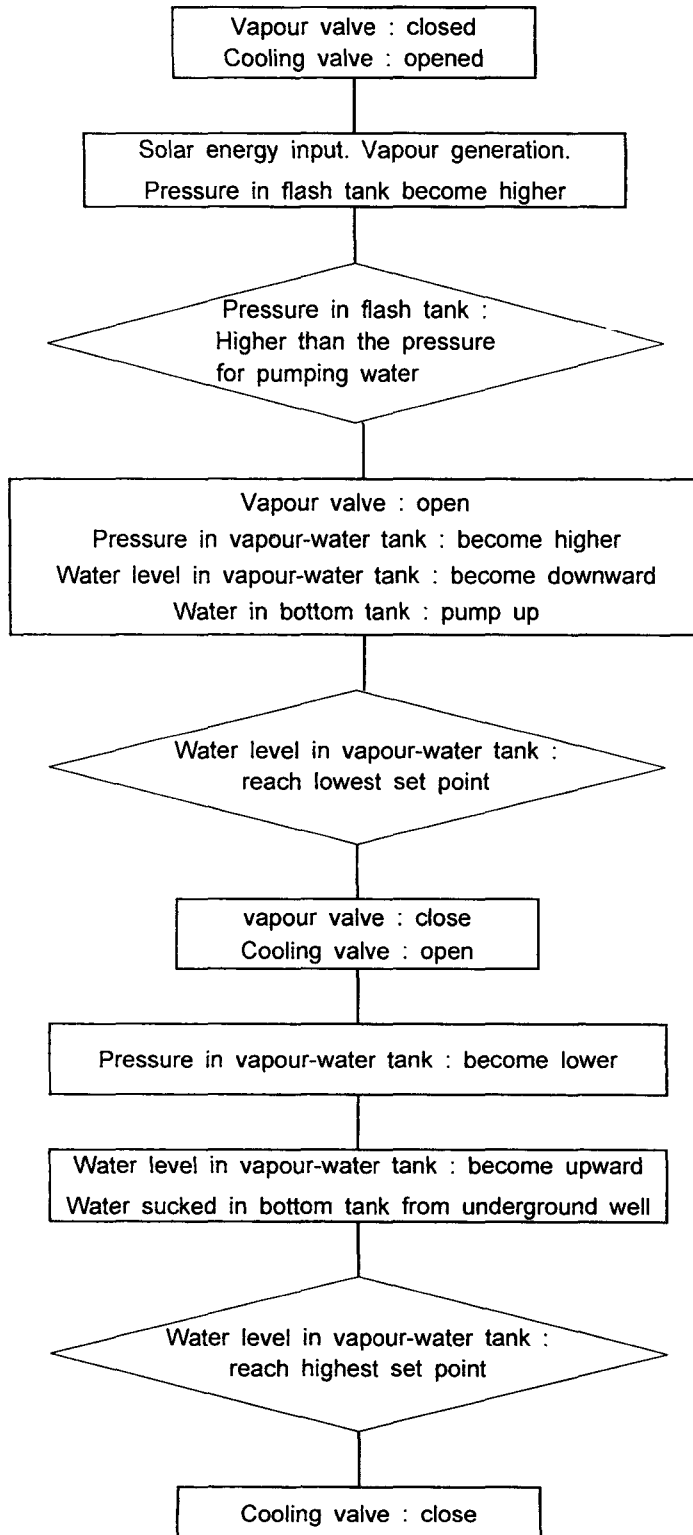


Fig. 3. Flow chart for automatic control.

### 3. 응축기 설계

응축기는 태양열로 가열된 작동물질 증기가 팽창하며 양수 일을 하고 난 후 사이클을 완성시키기 위해 냉각시켜 원래의 상태로 되돌리는 기능을 한다. 냉각해야 할 최소한의 열량은 한 사이클 당 최소일을 기준으로 결정할 수 있으며 사이클 당 최소일은 양수해야 할 사이클당 유량과 양정이 결정되면 계산된다. 최소일이 계산되면 가역사이클인 Carnot cycle의 이론 열효율의 관계에서 냉각해 주어야 할 최소일이 계산된다. 이를 토대로 응축기 내에서 냉각열량과 교환열량과의 관계에서 전열면적을 계산할 수 있으며 그 과정을 흐름도로 나타내면 그림 4와 같다.

계산에 관계된 방정식은 에너지 보존방정식에 근거한 것으로서 냉각수가 얻은 열량은 작동물질증기가 잃은 열량과 같으며 이것은 또한 전열면적을 통과하여 전달된 열량과 같다는 것으로서 흐름도내에 나타낸 식과 같다.

그런데 응축기설계에서 제일 중요한 것은 전열면적으로서 전열면적은 총괄열전달계수와 냉각수 입구의 온도수준에 따라 달라진다. 전열관계식에서 보면 총괄열전달계수와 전열면적은 반비례하게 되며, 또한 냉각에 소요되는 시간을 줄이려면 전열면적을 크게 하면 되는데 역시 전열면적과 냉각소요시간 사이는 반비례의 관계가 있다. 본 연구에서는 총괄열전달계수를 기존연구에 의한 20~30 W/m<sup>2</sup> (Kwant, 1981)의 값을 참조하여 25 W/m<sup>2</sup> 으로

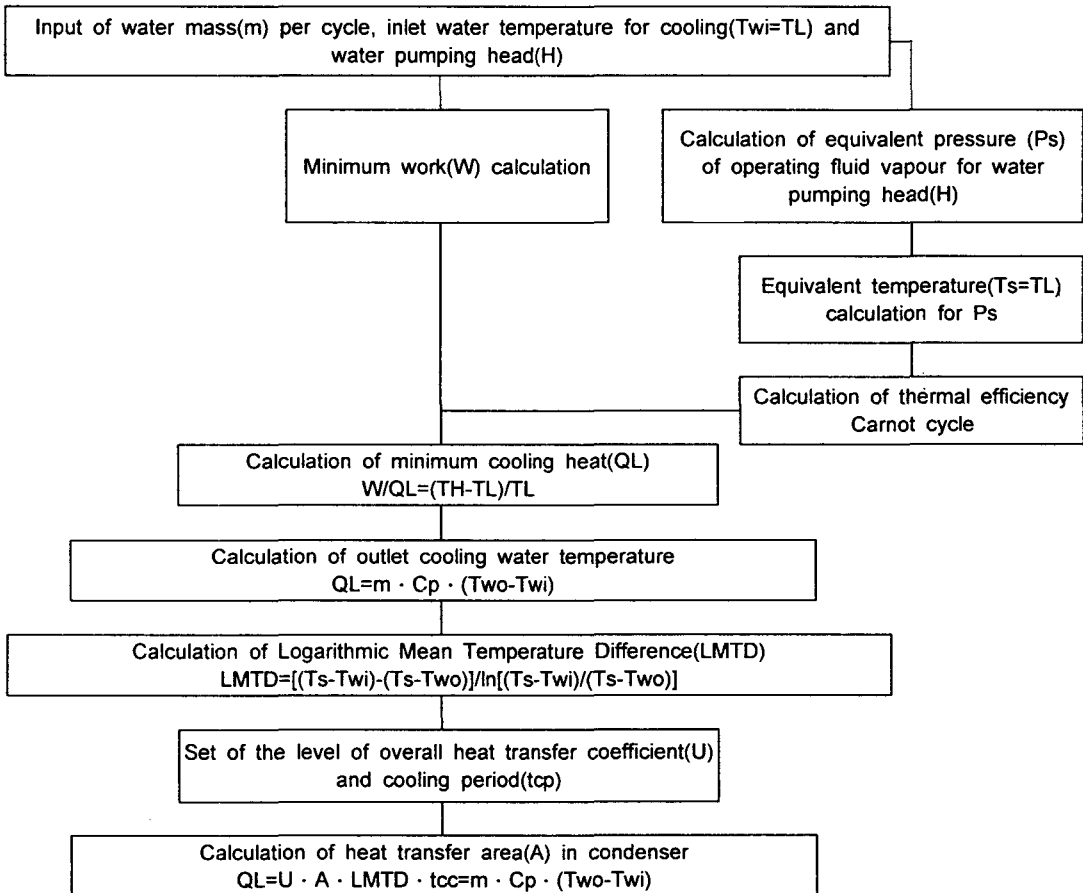


Fig. 4. Flow chart for calculating the heat transfer area in condenser.



하여 냉각수입구 온도를 지하수를 양수하는 경우를 고려하여 15~25℃ 범위에서 3수준, 사이클 당의 양수량을 20~40 liters 범위에서 3수준, 냉각에 소요되는 시간을 2~6분 범위에서 3수준으로 하여 각각 전열면적을 계산하였다. 계산된 전열면적은 고려해주어야 할 최소한의 면적으로서 실제로는 비가역 사이클인 점 등을 고려하여 이보다 큰 값으로 결정하여야 한다. 이때 열교환기의 형식은 총괄열전달계수와 대수평균온도차에 반영되고 있다.

#### 4. 효 율

장치의 효율을 나타내는 가장 중요하고도 우선적인 것은 열효율이다. 가역과정의 측면에서 이론열효율은 카르노사이클(Carnot cycle) 열효율이 되는데 이는 고온열원과 저온열원의 온도만으로 결정되는 장치한계 열효율이 된다. 실제 열효율은 장치시스템에 투입된 열에너지에 대해 실제로 양수에 사용된 일량의 비율을 나타내는 시스템 총에너지효율과 작동물질에 투입된 에너지에 대한 양수 일량의 비율을 나타내는 사이클 열효율이 있으며, 수식으로 나타내면 방정식 (2)와 같다. 위치에너지는 방정식 (3)과 같이 표현되며, 양수량과 양정의 크기에 따라 결정된다. 위치에너지로 변하지 않은 나머지 에너지는 주로 냉각수에 의해 저 열원으로 방열되며, 장치각부로부터 외기로의 방열, 물 피스톤으로의 전열, 마찰손실 등으로 분산된다. 열효율의 계산은 실험시간 중 투입된 복사에너지 공급을 위한 전력량을 측정하고 같은 기간 중 양수된 물에 대한 위치에너지를 계산하여 적용하였다.

$$\eta = \frac{W}{Q_{input}} \times 100(\%) \dots\dots\dots (2)$$

$$W = m \cdot g \cdot H \dots\dots\dots (3)$$

단,  $\eta$ : 열효율,  $W$ : 일,  $Q_{input}$ : 공급열량,  $m$ : 양수량,  $g$ : 중력가속도,  $H$ : 양정

#### 5. 실험방법

실험에서의 열원은 태양에너지 공급의 불균일성과 태양열 집열기의 영향을 배제하고 물펌프만의 성능을 확인하기 위하여, 또한 실험시간을 단축하기 위하여 태양에너지 대신 복사가열장치를 이용하여 균일한 복사열 에너지를 공급하여 수행하였다. 열 공급부에 500 W 복사열가열장치 두 개를 작용시켜 1 kW의 복사열을 작동물질인 펜탄이 들어있는 컨테이너 상단에 근접 작용시켜 증기를 발생시켰다. 복사열의 강도는 태양상수보다는 적 으며 한국의 평균 태양강도보다는 큰 값이 된다. 증기의 발생에 의하여 기액 분리탱크 내에 증기가 모여 증기의 압력이 높아지면 그 압력을 압력센서로 감지하여 제어장치에 입력된 프로그램에 의해 기액 분리탱크와 물 탱크와의 사이에 있는 밸브를 열어 증기가 물탱크로 진입하여 물탱크내의 물기등을 하 단으로 밀어 물 피스톤 역할로서 공기탱크 속으로 물이 공기를 밀어 압축시키도록 하였다. 공기탱크속의 공기가 압축되어 양정에 상당하는 압력이 되면 바닥탱크속의 물을 밀 어 물을 양수한다. 물탱크 내의 물 피스톤의 위치가 하강하여 압력이 떨어지면 기액 분리 탱크와 물탱크와의 사이 밸브를 닫고 물탱크 와 응축기와 사이에 있는 밸브를 열어 물 탱크속의 증기가 응축기로 이동, 응축되도록 하였다. 공기탱크 속에 있던 물이 물탱크로 이동되고 공기탱크 내가 진공이 되면 이와 연결된 바닥탱크 속으로 바닥물이 들어오게 된다. 물탱크속의 물이 원위치 되고 기액 분 리탱크 속의 압력이 양수에 충분한 압력이 되면 다시 사이클을 시작한다. 이 과정에서 응축기에는 냉각수가 순환되는데 냉각수는 양수한 물을 이용하였으며, 실험시간을 줄이

고 확실한 결과를 확인하기 위하여 얼음을 넣어 물의 온도를 낮추었다. 양수된 물이 중력에 의해 자연 순환되는 량을 측정할 바, 물 저장탱크 수위에 따라 다소 다르기는 하지만 저장탱크 반 정도 수위에서 약 11.5 kg/min 정도의 유량이었다. 전자밸브를 열고 닫는 시점은 기액 분리탱크 내의 압력이 450 hPa(gauge)이면 열고 150 hPa(gauge)이면 닫도록 컴퓨터프로그램으로 만들어 제어장치에 옮겨 넣음으로서 자동제어 되도록 하였다. 응축기는 진공펌프를 이용하여 250 hPa 정도의 진공으로 만들어 초기 사이클에 문제가 없도록 하였다.

측정항목은 양수량, 각부의 온도, 압력, 유체의 위치, 적산전력량 등이었으며, 이 값들을 이용하여 필요한 계산을 하여 분석하였다. 물탱크와 공기탱크내의 물기둥의 위치를 경시별로 측정하였으며, 측정의 시간간격은 물 피스톤의 위치에 따라 밸브를 열고 닫을 때마다 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 양수량과 효율

실험에서 각 사이클마다 양수된 양은 그림 5에 나타낸 바와 같다. 그림에는 자동화 운전에 의한 양수량과 수동운전에 의한 양수량을 나타내었다. 자동운전에 의한 사이클당 양수량은 초기 약 8,000 cc에서 출발하여 사이클이 반복되면서 약 4,000 cc 정도에서 유지되었으며, 이는 작동물질 증기의 양과 그 압력에 좌우되므로 태양에너지의 강도가 세고 태양에너지 집열기 면적이 넓으면 증가할 것이다. 약 60분 동안에 13 사이클을 수행하였으며, 사이클 당 소요시간은 약 4.9분이었다. 총 양수량은 69,200 cc, 사이클 당 평균 5,320 cc를 양수하였다. 이 과정동안에 공급된 복사에너지를 위한 전력에너지는 1 kWh

이었으며, 양정 157 cm인 물의 양수에 대한 위치에너지를 공급에너지에 대한 비율로서 시스템 총에너지효율을 구하면 0.030%가 된다. 한편 수동 운전 시에는 약 11 사이클로서 자동운전시보다 사이클 시간이 약간 길게 나타났으며 이는 수동 운전 시 임의로 밸브 개폐시간을 조절하였기 때문에 직접적인 비교는 힘들 것으로 판단된다. 수동운전시의 시스템 총에너지효율을 구하면 약 0.018% 정도로 나타났다. Sumathy(1999)는 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 열효율이 0.12~0.14%를 나타낸다고 하였고, Wong 등(2000)의 장치에서는 열효율이 0.42~0.34% 정도가 된다고 하였다. 본 연구에서의 에너지 변환 효율이 기존 연구보다 매우 낮게 나타난 것은 몇 가지 관점에서 검토해 볼 수가 있다. 우선 시스템 총에너지효율과 사이클 열효율을 구분하여야 하는데 그것은 효율계산에서 공급열을 장치외부에서 공급한 에너지로 적용할 것인가 아니면 그 중 작동물질로 직접 전달된 열량으로 할 것인가의 차이가 된다. 태양에너지는 집열기를 통해 작동물질로 전달되는데 집열기로 들어오는 태양강도에 대해 작동물질로 공급된 에너지의 비율인 집열기의 효율은 외기온과 집열기 온도 등에 따라 달라질 것이지만 Sumathy(1994)에 의하면 펌프를 가동할 경우 20% 전후로 유지된다고 하였다. 이 경우 장치로 공급된 에너지와 작동물질에 흡수된 에너지의 관계는 5배의 수준크기가 된다. 사이클 효율은 집열기를 통해 작동물질로 투입된 열량을 기준으로 구할 수 있으나 본 연구에서는 매 사이클마다의 작동물질의 건도를 정밀 파악하기 어려워 장치전체에 투입된 에너지를 기준으로 총 효율을 계산하였기 때문에 효율이 낮게 나타난 것이다. 두 번째는 일반적인 경향으로서 고온열원의 온도가 낮고 저온열원의 온도차가 적기 때문이다. 화석연료를 이용한 내연기관이나 외연기관의 경우 엔진 내부의 연소온도가

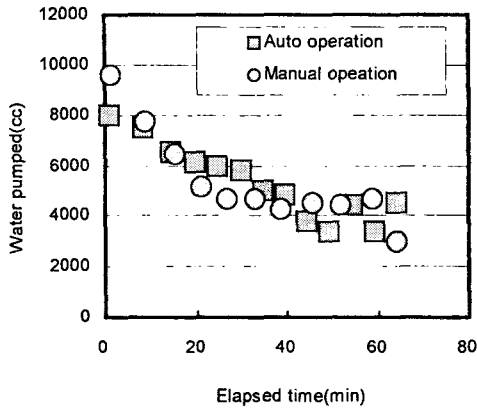


Fig. 5. Water pumped per cycle vs. elapsed time depending on operation method.

매우 높기 때문에 열효율이 높지만 자연에너지와 같이 에너지밀도가 낮은 열원을 이용할 때에는 고열원의 온도가 낮으며, 이러한 현상은 작동물질의 가열부 온도가 사이클을 계속하여 상승되면 어느 정도 높아질 것으로

판단된다. 한국의 전국 하루 평균 3.488 kWh / (m<sup>2</sup> · day)의 태양에너지를 기준으로 장치의 열효율이 0.1%인 경우를 적용하고 전 양정을 10 m로 보면 태양열복사 단위면적 m<sup>2</sup>당 약 128 kg의 물을 양수할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 온도의 변화

각부의 온도변화는 그림 6과 같다. 기액 분리탱크 내의 작동물질 증기의 온도는 물탱크로 증기를 배출하기 전후에 따라 약 41~49 °C 범위에 있었으며, 상당히 균일하게 변동하고 있었다. 물탱크와 공기탱크내의 온도는 약 30 °C 정도 부근에서 유지되고 있었으며 이는 사이클이 반복되면 단열이 된 상태이므로 약간 상승할 것이 예상된다. 응축기 냉각수 공급온도는 실험기간 중 10~13 °C 범위를 나타내었다. 응축기 출구온도는 14~17 °C 정도로서 응축기 냉각수의 입출구 온

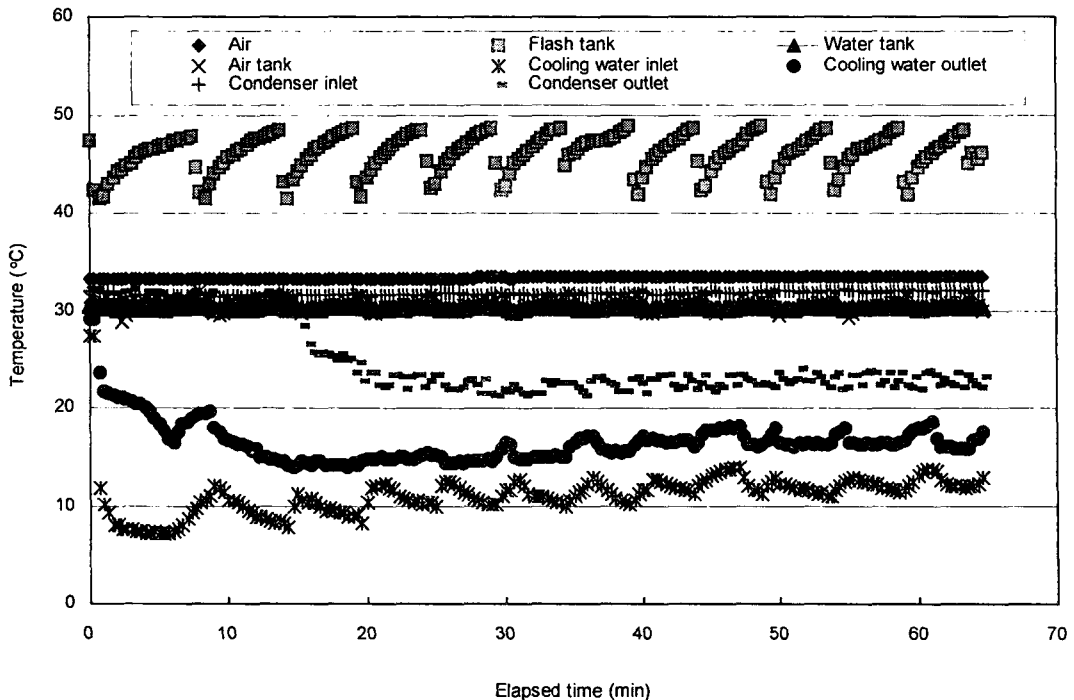


Fig. 6. Temperature history in the experimental system.

도차는 실험초기를 제외하면 약 4℃ 전후로 나타났다.

### 3. 사이클 예상 압력과 수위변화 패턴

사이클이 반복되는 과정에서 기액 분리탱크와 증기물탱크 내부의 압력과 수위의 변화 패턴을 나타내면 그림 7과 같다. 즉, 태양열이 공급되면 작동물질이 기화하여 기액 분리탱크 내에 증기가 차게 되고 압력이 상승하게 된다. 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 연결밸브를 개방하면 작동물질 증기가 증기물탱크로 밀고 들어가서 양수에 필요한 압력에 도달하면 물을 아래로 밀어붙여 연결된 공기물탱크와 배관을 통하여 물을 양수하게 된다. 하강을 계속하여 증기물탱크내의 수위가 설정된 최 하단 위치에 도달하면 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 닫고 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 열어서 증기물탱크 속의 증기를 냉각시킨다. 냉각이 진행되어 증기물탱크 내 진공이 형성되어 수위가 설정된 최 상단 위치에 이르면 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 닫고 기액 분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 열어서 다음 단계의 사이클을 다시 시작하도록 한다. 응축기내에서 응축된 작동물질을 회수하는 방법은 응축기 하단의 응축작동물질 집적탱크상단의 밸브를 닫고 집적탱크의 좌측과 하단탱크를 열어 작동물질 가열부와 압력평형을 만들어 작동물질을 가열부로 되돌리게 한다.

### 4. 압력의 변화

실험장치내의 압력변화를 살펴보면 그림 8에 나타낸 바와 같다. 자동운전을 위해 기액 분리탱크 내의 압력이 450 hPa(gauge)가 되면 전자밸브를 열어 발생된 증기를 물탱크내로 유입시켜 양수가 되도록 하고 그 압력이 150

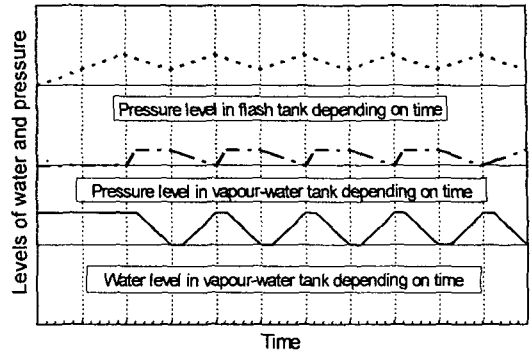


Fig. 7. Pressure and water level variation pattern in tanks during cycles.

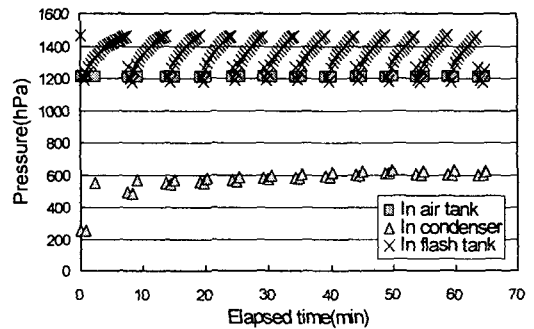


Fig. 8. Pressure history in the elements of the experimental system.

hPa(gauge)로 하강하면 전자밸브가 닫히도록 프로그램 되었기 때문에 기액 분리탱크 내의 압력은 정확하게 이 범위로 유지되었다. 공기탱크내의 압력은 약 1200 hPa, 응축기내의 압력은 약 600 hPa로서 진공을 잘 유지하고 있었다.

응축기내의 압력은 초기에 약 250 hPa가 되도록 진공펌프로써 진공을 만들었던 바 작동물질증기가 응축이 되면서 압력이 약간 상승하였으며, 약 600 hPa 정도를 유지하며 사이클이 진행되었다.

### 5. 응축기 최소전열면적

태양열 물펌프의 응축기의 열 교환에 필요

Table 3. Minimum heat transfer area in condenser(Basic condition-Cooling time : 4 minutes, Water mass per cycle : 40 kg, Cooling water temperature : 15 °C)

Pumping head(m)	Three levels of Cooling water temperature(°C)			Three levels of Water mass per cycle(kg)			Three levels of Cooling time(minute)		
	15	20	25	20	40	60	2	4	6
1 (m)	0.27	0.36	0.53	0.18	0.36	0.53	0.71	0.36	0.24
2 (m)	0.32	0.43	0.64	0.21	0.43	0.64	0.85	0.43	0.28
3 (m)	0.35	0.46	0.70	0.23	0.46	0.70	0.93	0.46	0.31
4 (m)	0.37	0.49	0.74	0.25	0.49	0.74	0.98	0.49	0.33
5 (m)	0.39	0.51	0.78	0.26	0.51	0.77	1.03	0.51	0.34
6 (m)	0.40	0.54	0.81	0.27	0.54	0.80	1.07	0.54	0.36
7 (m)	0.41	0.55	0.83	0.28	0.55	0.83	1.11	0.55	0.37
8 (m)	0.43	0.57	0.86	0.29	0.57	0.86	1.14	0.57	0.38
9 (m)	0.44	0.59	0.89	0.29	0.59	0.88	1.18	0.59	0.39
10 (m)	0.45	0.60	0.91	0.30	0.60	0.91	1.21	0.60	0.40

한 최소한의 전열면적은 앞서 언급한 바대로 냉각수의 온도수준과 유량수준, 냉각에 소요되는 시간수준을 각각 3수준씩으로 하여 그림 3에 나타낸 흐름대로 계산하였으며 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3은 냉각수의 온도수준, 사이클 당 양수량, 냉각시간수준, 양정의 수준에 따라 최소 전열면적을 나타낸 것으로서 이는 확보해야 할 최소한의 면적으로서 실제로는 비가역 사이클인 점 등을 고려하여 이보다 큰 값으로 결정하여야 한다.

### 적 요

자연에너지인 태양열을 동력원으로 하여 구동되는 물펌프는 물이 많이 필요한 여름철에 그 열원인 태양에너지가 강하므로 매우 이상적인 장치라 할 수 있다. 본 연구에서는 태양열 물펌프의 자동화운전을 실현하고자 작동물질의 압력변화를 감지하여 자동 운전 되도록 하였으며, 이에 필요한 제어논리를 개발하고 회로를 구성하였다. 실험에서는 장

치를 제작, 실험, 분석하였고 분석항목은 양수량과 효율, 압력, 온도를 분석하였다. 또한 자동화에 필수적인 응축기 진공을 위한 응축기의 최소 전열면적을 설계하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 복사에너지를 동력으로 변환하여 물을 양수할 수 있었고, 자동화 제어회로에 의해 사이클을 반복할 수 있었다.

2. 양수는 60분 동안에 13사이클을 수행하였으며, 사이클 당 소요시간은 약 4.9분이었다. 총 양수량은 69,200 cc, 사이클 당 평균 5,320 cc를 양수하였다. 이 과정동안 장치의 열효율은 0.030 %로 나타났다.

3. 실험과정에서 기액 분리탱크 내의 작동물질 증기의 온도는 물탱크로 증기를 배출하기 전후에 따라 약 41~49 °C 범위에 있었으며, 상당히 균일하게 변동하고 있었다. 물탱크와 공기탱크내의 온도는 약 30 °C 정도 부근에서 유지되고 있었으며, 응축기 냉각수 공급온도는 실험기간 중 10~13 °C 범위를 나타내었다. 응축기 출구온도는 14~17 °C 정

도로서 응축기 냉각수의 입출구 온도차는 실험초기를 제외하면 약 4 °C 전후로 나타났다.

4. 기액 분리탱크 내의 압력은 자동화 프로그램 된 범위인 150~450 hPa(gauge)를 매우 정확하게 유지하였으며, 공기탱크내의 압력은 약 1200 hPa로 나타났다. 응축기내의 압력은 약 600 hPa로서 진공을 잘 유지함으로써 사이클을 반복하는데 문제가 없었다.

5. 한국의 전국 하루 평균 3.488 kWh/(m<sup>2</sup>·day)의 태양에너지를 기준으로 장치의 열효율이 0.1%를 적용하고 전 양정을 10 m로 보면 태양열복사 단위면적 m<sup>2</sup>당 약 128 kg의 물을 양수할 수 있을 것으로 예상된다.

### 인 용 문 헌

1. Al-Haddad, A. A., Enaya, E. and Fahim, M. A. 1996. Performance of a thermodynamic water pump. Applied thermal engineering Vol. 16, No. 4. pp. 321-334.
2. Kwant, K. W., Rao, D. P. and Srivastava, A. K. 1981. Experimental studies of a solar water pump. In: Proc. Int. Solar Energy Congress, Brighton. pp. 1172-6.
3. Rao, R. and Hariprakash, R. 1990. Theoretical and experimental investigations of a solar thermal water pump. PhD thesis. Dept of Mechanical Engng. Indian Institute of Technology. madras. India.
4. Sudhakar, K., et al. 1980. Analysis and simulation of a solar water pump for lift irrigation. Solar Energy 24. 71.
5. Sumathy, K., Venkatesh, A. and Sriramulu, V. 1994. Heat transfer analysis of a flat-plate collector in a solar thermal pump, Energy 19. pp. 983-991.
6. Sumathy, K. 1999. Experimental studies on a solar thermal water pump. Applied thermal engineering Vol. 19, pp. 449-459.
7. Wong, Y. W. and Sumathy, K. 2000. Performance of a solar water pump with ethyl ether as working fluid. Renewable energy 22. pp. 389-394.
8. 기상청 홈페이지. 2000. <http://www.kma.go.kr/index.jsp>
9. 김영복. 2004. 저온상변화물질 특성을 이용한 태양열 물펌프 실용화 연구개발 연구보고서. 에너지관리공단.
10. 김영복 등. 2003. 저온 상변화 물질 특성을 이용한 태양열 물펌프 실용화 연구개발 (II) - 시스템 구성 및 작동분석 - 한국 축산시설환경학회지 9(2):69-78.
11. 한국태양에너지학회. 1991. 태양에너지 핸드북. 태림문화사.