바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 29, No. 6, pp. 521~530 (2004)

태양열 물펌프의 실험적 성능분석

김영복 손재길 이승규 김성태 나우정 이양근

Experimental Analysis on the Performance of a Solar Powered Water Pump

Y. B. Kim J. G. Son S. K. Lee S. T. Kim W. J. La Y. K. Lee

Abstract

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 electrical power is not available. The average solar radiation power is 3.488 kWh/ (m^2 · day) in Korea. In this study, the experimental system of the water pump driven by the radiation energy were designed, assembled, tested and analyzed for realizing the solar powered water pump. Energy conversion from radiation energy to mechanical energy by using n-pentane as operating material was done and the water pumping cycles were able to be continued. The quantity of the water pumped per cycle ranged from 2 L to 10 L depending on the level of the valve open area for the vapour supply. The average quantity was about 4,366 cc. The thermal efficiency was about 0.018%. The pressure level of the n-pentane vapour in flash tank was about 110~150 kPa and that in the water tank was 93~130 kPa. The pressure in the condenser during cycles was maintained as about 70 kPa. The condensation of the n-pentane vapour in the water tank was increased with the cycles even though the internal and external insulation were done. Air tank performance was better with increasing of the water piston displacement and the water could be pumped with the water piston displacement becoming higher than 6,500 cc.

Keyword : Solar energy, Water pump, Energy conversion, Thermal efficiency, Phase change material

1. 서 론

태양열 물펌프는 그 동력원이 태양에너지로서 그 자원이 풍부하고 청정에너지이다. 이러한 장치는 화석에너지의 자원한계나 사용상의 환경공해 같은 문제점에 대한 하나의 좋은 극복방안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 태양열 물펌프는 모터나 엔진을 사용하지 않고 물을 양수할 수 있기 때문에 매우 유리하며, 또한 물이 많이 필요한 여름철에 그 구동력인 태양열이 강하므로 매우 이상적인 장치로 볼 수 있다. 그리고 이 장치를 농촌에 이용할 때의 또다른 장점으로는 논에 지하수를 바로 공급하면 벼가 냉해를 입을 수가 있는데 이와 같은 문제는 본 과제에서의 장치를 이용하면 상당히 극복될 수가 있다. 왜냐하면 본 장치를 통해 양수된 물은 그 온도가 지하수 온도보다 높게 배출되는데, 그것은 열기관화된 장치의 방열에 필요한 저열원을 양수한 물이 이용되어 열기관화된 장치에서 방출된 열량이 양수된 물에 추가되기 때문이다.

한국의 태양열 일사량을 일년 평균치로 계산하면 서울을 제외하고 하루 약 3.488 kWh/(m^2 · day) 정도의 일사에너지

This study was conducted as one of the projects of the energy · resources technology development supported by Ministry of commerce, industry and energy. The article was submitted for publication in September 2004, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2004.

The authors are Y. B. Kim, S. K. Lee, S. T. Kim, W. J. La, KSAM member, Institute of Agriculture and Life Sciences, NURI, Gyeongsang national university, J. G. Son, KSAM member, Denso PS Electronics Corp. and Y. K. Lee, KSAM member, Sangju national university. The Corresponding author is Y. B. Kim, Professor, 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>

를 받고 있으며(한국태양에너지학회, 1991), 2000년 우리나라 지역의 평균 연간 총 일조시간은 약 2,112시간(기상청, 2002), 하루 평균 일조시간은 5.786 시간으로 나타났다.

태양열 물펌프는 태양열을 동력으로 변화하는 방법에 따라 태양열 집열기에서 Methyl chloride(Bhide, 1975), Monochloro benzene(Tabor, 1964)과 같은 작동물질을 증기로 만들어 터어빈이나 왕복피스톤을 구동하여 물펌프를 작동시키는 방법이 있고, 태양전지에 의해 모터를 구동하여 펌프를 구동하는 방법, 공기의 주야간 고온팽창특성을 이용한 방법(McVEIGH, 1977), U자형튜브내의 공기진동특성을 이용한 방법(Farber, 1974), 저온상변화물질이 저온에서 증발, 응축하는 특성을 이용하는 방법 등이 있다. 여기서 터어빈구동형은 장치가 복잡하고 제작비가 많이 들고, 태양전지는 고가이며, 공기를 작동물질로 이용하는 것은 사이클횟수가 적은 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하는 방법으로서 저온상변화물질을 이용하는 방법이 연구되어 왔으며, 본 연구에서의 방법과 관련하여 살펴보면 다음과 같다. Sudhakar 등(1979)은 개량된 태양열 물펌프를 만들었는데 동력변환부분에서 물과 작동유체 사이의 접촉면적을 플로우트를 이용하여 내부단열형식으로 차단함으로서 열효율을 높이려 하였고, 이때 작동물질은 부탄, 혹은, CFC 11을 이용하였다. Kwant 등(1981)은 응축기와 물피스톤부를 분리한 장치를 제안하여 성능을 분석한 바 있다. 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 물펌프용기의 크기를 적절하게 조절하므로서 성능향상을 도모하였다. 그리고 Sumathy(1999)는 1 m^2의 평판형 태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 펜탄을 이용하였으며, 토출양정의 수준에 따른 펌프구동사이클을 분석하였고, 전체적인 열효율 0.12-0.14%를 나타낸다고 하였다. Wong 등(2000)은 1 m^2의 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 에틸에테르를 이용하였으며, 토출양정 6-10 m일 때 하루 700-1400 l/day의 물을 양수할 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. 국내에서는 본 연구팀의 김 등(2002-2004)에 의해 저온상변화물질을 이용한 태양열 물펌프의 작동과정에서의 열역학적인 이론해석과 이론효율, 최대일 판단을 위한 엑서지(Exergie)분석, 동력변환실험, 응축성능분석 등의 연구가 있다.

본 연구에서는 이를 바탕으로 하여 태양열 물펌프장치를 실현할 목적으로 복사가열에너지를 일로 변환하여 물을 양수하는 장치를 제작, 실험 분석하였으며, 구체적으로는 사이클당 양수량, 에너지변환효율, 각부의 온도와 압력변화, 응축기를 비롯한 장치 각 구성부들의 효율 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시스템구성과 작동원리

태양열 물펌프는 열역학적으로 보면 복사에너지를 양수되는 물의 위치에너지로 변환하는 것이다. 본 연구에서는 태양열 공급의 불균일성을 극복하기 위하여, 그리고 실험시간의 단축과 운전변수의 수준에 따른 장치특성을 명확하게 규명하기 위하여 태양열 집열기에 상당하는 복사가열장치를 제작하여 실험하였다. 장치시스템은 작동물질과 물, 공기의 양과 상태변화, 그리고 그 이동이 전양정과 양수량에 따라 효율적으로 이루어지도록 구성 설계되어야 한다. 설계 제작된 장치는 그림 1과 같다. 그림 1에서 탱크 F는 작동물질증기를 저장하는 기능을 하며, 작동물질은 복사에너지를 받아 가열, 증발되어 탱크 F내의 압력이 상승하게 된다. 탱크 F의 압력이 상승하여 탱크 F와 W 사이의 밸브가 열리면 작동물질증기는 물탱크 W로 들어가며 탱크 내의 물피스톤을 밀어 공기탱크 A로 들어가게 한다. 이에 따라 공기탱크 A내의 공기는 압축되며, 그 압력이 양수할 물의 전양정에 상당할 정도로 상승하게 되면 압축공기는 바닥의 탱크 B로부터 물을 밀어 올려 양수된 물의 저장탱크 S로 보내게 된다. 물이 양수되면서 공기탱크 A가 물로 채워지게 되면 탱크 F와 W 사이의 밸브는 닫히고 탱크 W와 응축기 C 사이의 밸브가 열려 팽창 후의 작동물질 증기는 응축기 C에서 응축된다. 이로 인해 공기탱크 A내의 압력은 하강하고 생성된 진공으로 인해 최종적으로는 바닥탱크 B속으로 바닥의 물이 들어오게 된다. 공기탱크 A가 전부 공기로 채워지게 되면 탱크 W와 응축기 C 사이의 밸브는 닫히고 다음 사이클을 기다리게 된다. 저장탱크 S와 바닥탱크 B 사이, 바닥탱크과 양수할 물의 하단사이에는 역지밸브(Check valve)가 설치되어 있어서 물이 한방향으로만 이동하도록 되어있다. 응축기에 양수된 물이 공급되어 작동물질 증기를 액화시키고 응축기를 통과한 물은 우리가 필요한 곳에 이용된다. 응축탱크내의 응축된 작동물질 액체는 분리탱크 F내의 온도나 압력신호를 통해 밤이 되어 양수사이클이 끝나면 작동물질 가열부와 연결된 응축기 하단의 밸브를 개폐함으로서 분리탱크로 유도할 수가 있다.

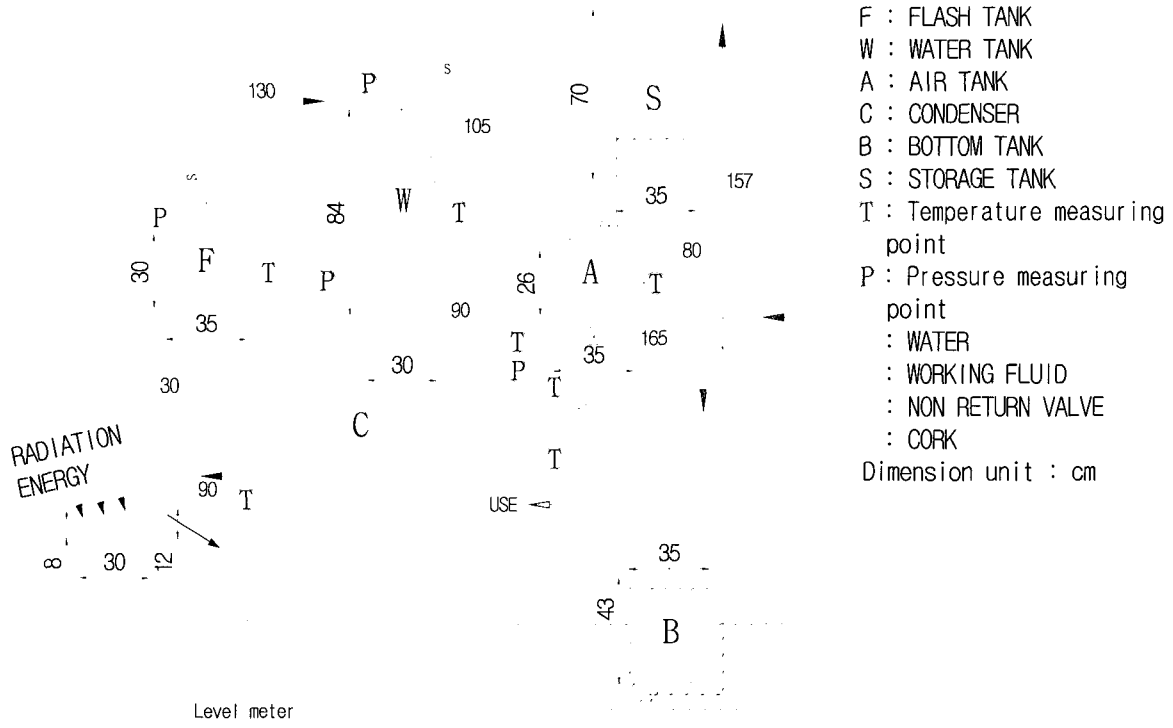


Fig. 1 System configuration.

나. 작동물질과 사이클

작동물질은 n-pentane를 선택하였으며, 그 선택은 비교적 저온에서 액체-기체 상변화하는 n-pentane과 ethylether를 대상으로 작동온도범위에서의 최대일해석, 즉, 에너지분석 결과에 따라 결정하였다(김, 2002). 작동물질인 n-pentane의 특성값(김, 2002)들은 표 1에 나타낸 바와 같다. 작동물질은 가열과 냉각의 여러 과정을 거쳐 하나의 사이클을 이루며, 이 과정에서 열에너지를 일로 변환하고 변환된 일로 물을 양수하게 된다. 작동물질이 거치게 되는 상태의 변화는 열역학적으로 이론분석할 수 있는데 본 장치에서와 같은 태양열 물펌프에서의 완전한 사이클선도의 작성과 그 해석은 엄밀한 열역학적 해석과정이 필요하다. 작동물질은 가열과 냉각, 밸브를 열고 닫음에 따라 정적가열, 단열혼합, 단열팽창, 정압팽창, 단열혼합, 정적냉각의 복잡한 과정을 거치게 되며 현열과 잠열의 입열과 방열이 이루어진다. 작동물질의 온도, 압력, 엔탈피, 비체적 등의 상태량은 장치를 구성하는 탱크의 크기와 배관공간의 크기, 작동상태에 따라 달라지게 된다. 이와 유사한 해석이 본 연구팀에 의해 수행된 바 있으며(김, 2002), 이에 대한 이론해석은 다음 기회에 발표하기로 하고 여기서는 실험성능 중심으로 분석하였다.

Table 1 Properties of n-pentane.

Property	Value
Molecular formula	C_5H_{12}
Molecular weight	72.146
Boiling point (K)	309.25
Density (g/ml)	0.626
Latent heat (kJ/kg)	358
Critical temperature (K)	469.77
critical pressure (MPa)	3.369
Critical density (g/ml)	0.232

다. 효율

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 나타내며 여기서는 투입된 복사에너지량에 대한 양수에 따른 위치에너지량의 비율이 된다. 위치에너지로 변하지 않은 나머지 에너지는 주로 냉각수에 의해 저열원으로 방열되며, 장치의 각부로부터 외기로의 방열, 물피스톤으로의 전열, 마찰손실 등으로 분산된다. 열효율은 실험기간 중 투입된 복사에너지 공급을 위한 전력량을 계측하고 같은 기간 중 양수된 물에 대한 위치에너지를 계산하여 산출하였다.

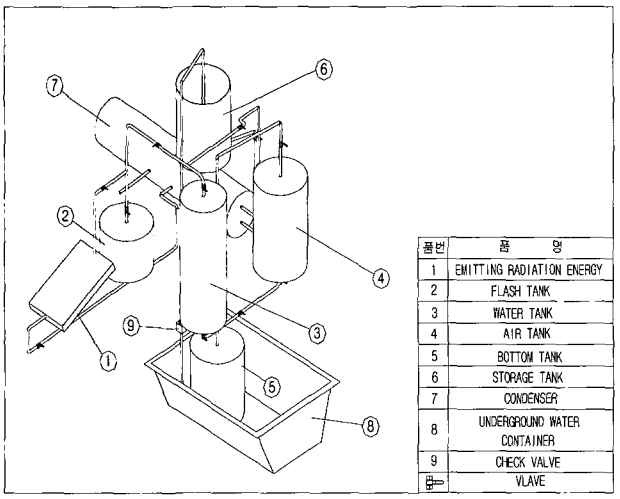
장치의 효율에 영향을 미치는 여러 요인 중 중요한 것은 물탱크 W 내에서 작동물질증기가 탱크내의 물에 냉각 응축되어 수위상단에 뜨게 되는 현상으로서 이것은 작동물질이 하는 일을 줄이게 되고 설계된 물탱크의 크기와 물피스톤의 크기를 벗어나게 하는 요인이 되므로 가능한 한 물탱크내 응축은 적은 것이 좋다. 실제 물탱크 내 작동물질의 응축은 기존의 연구(김, 2003)와 예비실험에서 많이 관측되었으며, 이를 방지하기 위하여 본 장치에서는 내부단열(Sudhakar, 1980)을 하였다. 이것은 탱크 내 물의 상단에 작동물질과 화학반응하지 않는 코르크와 같은 물질로 된 원판을 넣어서 물피스턴과 함께 움직이도록 하는 것으로서 물피스턴과 상단의 작동물질 증기와의 접촉면적을 줄여 전열을 줄이게 된다. 장치에서의 이러한 현상을 분석하고 개선하기 위하여 물탱크효율개념(Kwant, 1981)을 도입하였다. 즉, 물탱크의 효율은 작동물질 증기가 얼마나 물탱크 내에서 응축이 되었는가를 나타내는 척도로서 여기서는 사이클반복과정에서의 물피스톤 체적이 실험초기 물피스톤의 체적에 비해 변하는 비율로 나타내었다. 공기탱크 A도 연결배관내 공간의 크기와 더불어 장치효율에 영향을 주게 되는데 공기탱크의 효율은 물탱크로부터 공기탱크내로 들어온 물피스톤이 공기탱크 내를 차지한 비율에 대해 양수된 물의 양으로 정의되며, 이 의미는 공기탱크내의 공기가 물피스톤에 의해 압축되어 양수될 물의 수두에 상당하는 압력에 도달할 때 비로소 양수가 시작되는 바 물피스톤 체적변위에서 압축 손실을 뺀 만큼 양수되는 결과가 된다. 따라서 그 정도를 공기탱크효율의 정의로서 나타내어 판단의 지표로 삼는다. 측정과 계산은 사이클마다 물탱크와 공기탱크 내에서의 물높이를 각각 측정하여 그 시각에서의 체적으로 계산 적용하였다.

라. 실험장치

실험장치의 구성과 각부 칫수는 그림 1에 나타난 바와 같고 내려다 본 입체배치도를 그림 2에, 전경을 사진 1에 각각 나타내었다. 사진 1에 나타난 장치에는 단열이 되어있지 않으나 실험시에는 장치의 열손실을 줄이기 위하여 각 탱크외부에는 40 mm두께의 단열을 실시하였다. 장치의 작동원리 및 흐름은 앞서 시스템구성과 작동원리에서 설명한 바와 같다. 장치를 구성하는 각 탱크들은 서로 그 크기간에 연관되어 있고, 이와 관련하여 본 연구팀에서는 장치구성품들간의 관계를 고려한 최적설계에 대해 연구한 바 있다(김, 2003). 본 장치에서는 작동조건의 규명을 위한 수준의 조절 등 실험의 목적상 그림 1과 같은 크기로 제작하였다. 응축기는 직접 제작하여 사용하기도 하지만(김, 2002-2003) 노력이 많이 소요되므로 여기서는 기성품을 구입하여 사용하였다. 응축기는 원통다관형으로서 동체 외경 267.4 mm, 동체길이 1,358 mm, 내부 관직경 20 mm, 본당길이 1.204 m, 사용총동관수 36개로서 총전열면적 8.34 m^2, 전열계수 약 1 $kW/(K \cdot m^2)$이었다. 장치구성에서 각 연결부에 솔레노이드밸브를 설치하여 자동화에 대비하였다.

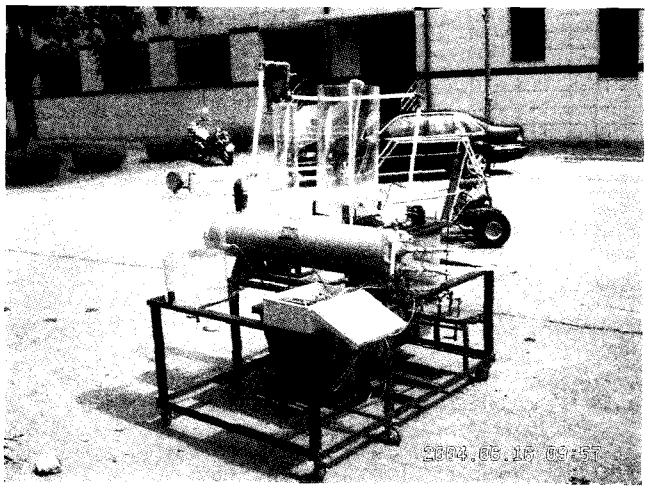
마. 측정부

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 높이관측창을 만들어 측정하였으며, 복사가열부의 펜탄량은



품번	품 명
1	EMITTING RADIATION ENERGY
2	FLASH TANK
3	WATER TANK
4	AIR TANK
5	BOTTON TANK
6	STORAGE TANK
7	CONDENSER
8	UNDERGROUND WATER CONTAINER
9	CHECK VALVE
⋈	VLAVE

Fig. 2 Overlooking view of the experimental system.



Picture 1 Picture of the experimental system.

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_2O.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 ϕ 3.2 mm
Electricity meter	220V, 40(10)A, 60Hz, 1.0 Wh/pulse, Single phase Omnisystem Corp.

사이폰튜브를 연결하여 그 량을 측정하였다. 전력량은 적산전력계를, 온도는 T타입 열전대온도센서를 사용하여 데이터로거에 1분간격으로 측정 저장하였으며, 압력은 응축기 내의 진공압력을 포함하여 각부 압력을 디지털압력계로 측정하였다. 특히, 물탱크내의 압력은 자동화를 고려하여 자동연속측정할 수 있도록 압력변환센서를 사용하여 측정하였다. 즉, 본 실험에서는 장치거동을 분석하기 위하여 수동으로 실험을 하였으나 사이클을 반복하여 연속적으로 자동양수하기 위해서는 그 과정을 자동화할 필요가 있다. 압력값은 -5000～5000 mmH_2O 범위의 압력변환센서를 설치하여 변환된 0～5 V 범위의 전기신호를 전압강하모듈(Voltage divider, Campbell)을 이용하여 0～2.5 V로 강하시켜 데이터로거(Campbell, CR10x)에 입력하였다. 압력센서에 의해 읽어들인 전압 V(mV)와 디지털압력계 압력 P(hPa)과의 관계는 P=0.8708V + 0.7017 (R^2=0.9999)로 나타났다. 측정과 관련한 각부의 사양은 표 2와 같다.

바. 실험방법

실험에서의 열원은 태양에너지공급의 불균일성과 태양열집열기의 영향을 배제하고 물펌프만의 성능을 확인하기 위하여, 그리고 실험시간을 단축하기위하여 태양에너지대신 복사가열장치를 이용하여 균일한 복사열에너지를 공급하여 수행하였다. 열공급부에 500 W 복사열가열장치 2 개를 작용시켜 1 kW의 복사열을 작동물질인 펜탄이 들어있는 콘테이너상단에 근접작용시켜 증기를 발생시켰다. 복사열의 강도는 태양상수보다는 적으며 한국의 평균태양강도보다는 큰 값이 된다. 증기의 발생에 의하여 기액분리탱크 내에 증기가 모여 증기의 압력이 높아지면 기액분리탱크와 물탱크와의 사이에 있는 밸브를 열어 증기가 물탱크로 진입하여 물탱크내의 물기둥을 하단으로 밀어 물피스톤역할로서 공기탱크속으로 물이 공기를 밀어 압축시키도록 하였다. 공기탱크속의 공기가 압축되어 전양정에 상당하는 압력이 되면 바닥탱크 속의 물을 밀어 물을 양수한다. 물탱크 W 내의 물피스턴의 위치가 내정된 만큼 하강하면 기액분리탱크와 물탱크 사이의 밸브를 닫고 물탱크와 응축기와의 사이에 있는 밸브를 열어 물탱크 속의 증기가 응축기로 이동, 응축되도록 하였다. 물피스턴의 하강과 상승의 위치는 공기탱크의 효율이 물피스턴의 위치에 따라, 즉, 양수량에 따라 변화정도를 확인하기 위하여 사이클마다 변화를 주어 실시하였다. 공기탱크 속에 있던 물이 물탱크로 이동되고 공기탱크 내부가 진공이 되면 이와 연결된 바닥탱크 속으로 바닥물이 들어오게 된다. 물탱크 속의 물이 원위치되고 기액분리탱크 속의 압력이 양수에 충분한 압력이 되면 다시 사이클을 시작한다.

이 과정에서 응축기에는 냉각수가 순환되는데 냉각수는 양수한 물을 이용하게 되지만 실험시간을 줄이고 확실한 결과를 확인하기 위하여 냉수를 제조하여 강제순환시켰다. 양수된 물로 냉각을 시킬 때 양수된 물과 응축되어야 할 작동물질 증기와의 온도차가 크지 않을 때는 전열면적을 충분히 확보함으로서 가능할 것으로 판단되고, 또한 지하수의 온도가 일반적으로 16℃ 정도인 점을 감안하면 특별한 문제는 없을 것으로 판단된다. 실제로 예비실험을 통해 본 결과 문제가 없었다. 응축기로 공급되는 냉각수의 공급유량은 17 kg/min로 하

였으며, 양수된 물을 중력에 의해 자연순환시켜 냉각시킬 때를 고려하여 자연순환량을 측정한 바 수위에 따라 다소 다르기는 하지만 저장탱크 반 정도 수위에서 약 11.5 kg/min 정도의 유량이었다. 냉각수의 온도는 실험기간 전반에 걸쳐 약 13℃ 정도로 공급하였다.

측정항목은 양수량, 각부의 온도, 압력, 유체의 위치, 적산전력량 등이었으며, 이 값들을 이용하여 필요한 계산을 하여 분석하였다. 물탱크와 공기탱크 내의 물기둥의 위치를 경시적으로 측정함으로서 물피스톤의 위치와 작동물질인 펜탄이 물탱크 내에서 응축하는 정도를 파악할 수 있게 된다. 측정의 시간간격은 물피스턴의 위치에 따라 밸브를 열고 닫을 때마다 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 양수량과 에너지변환효율

실험에서 각 사이클 마다 양수된 양은 그림 3에 나타낸 바와 같다. 양수량은 약 2,000 cc에서 10,000 cc 사이에서 양수되도록 실험하였으며, 이 양수량은 기액분리탱크내의 압력이 허용하는 범위내에서 물펌프내의 물피스톤을 어느 정도 밀어내느냐에 따라 결정되는 것이기 때문에 본 장치에서는 적어도 사이클 당 10,000 cc 정도는 양수할 수가 있다. 사이클당 평균 4,366 cc의 물을 양수하였으며, 양수량은 태양열 집열기의 면적과 태양강도에 따라 필요한 압력상태의 증기가 어느 정도 빨리 발생되느냐에 따라 밸브 여는 시각이 달라지게 되고, 이에 따른 사이클당 시간과 하루 중 사이클 수에 따라 총 양수량이 달라지게 되는 것이다.

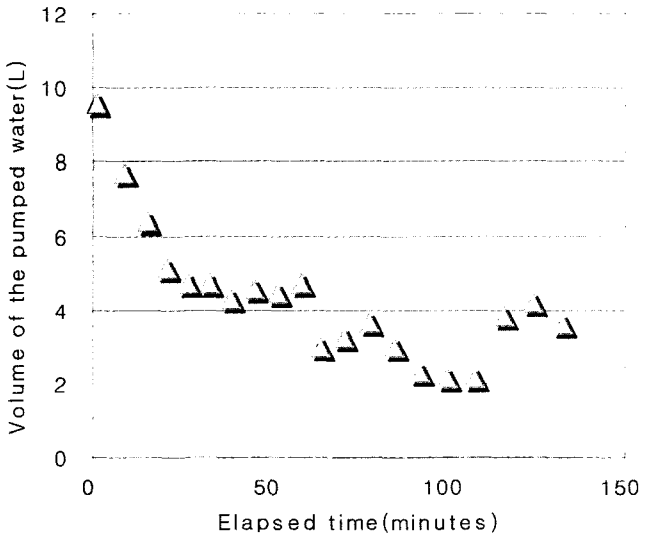


Fig. 3 Volume of the pumped water depending on cycle.

복사열에 의한 물펌프의 효율을 계산해 보면 적산전력계에 나타난 전력사용량은 2.1 kWh로서 이 전력량이 복사에너지로 되어 작동물질콘테이너를 가열하였으며, 가열된 복사에너지가 증기를 만들어 그 증기의 힘이 동력을 변환되어 약 2시간 10분 동안 20사이클을 반복하며 총 87,326 cc를 양수하였다. 양수된 토출양정은 157 cm로서 이를 일량으로 환산하여 장치효율을 계산하면 약 0.018%로 나타난다. 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 에너지변환효율이 기존 연구보다 매우 낮게 나타난 것은 몇가지 관점에서 검토해 볼 수가 있다. 우선 시스템총에너지효율과 사이클열효율을 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 집열기온도 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. 사이클효율은 집열기를 통해 작동물질로 투입된 열량을 기준으로 구할 수 있으나 본 연구에서는 매사이클 마다의 작동물질의 건도를 정밀 파악하기 어려워 장치전체에 투입된 에너지를 기준으로 총효율을 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 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^2 · day)의 태양에너지를 기준으로 장치의 열효율이 0.1%인 경우를 적용하고 전양정을 10 m로 보면 태양열복사 단위면적 m^2당 약 128 kg의 물을 양수할 수 있을 것으로 예상된다.

나. 온도의 변화

실험과정에서의 각부온도변화를 나타내면 그림 4와 같다. 기액분리탱크내의 작동물질 증기의 온도는 그림 4의 최상단 그래프로서 물탱크로 증기를 배출하기 전후에 따라 약 40~49℃ 범위에 있었으며, 가장 낮은 곳은 응축기 냉각수공급위

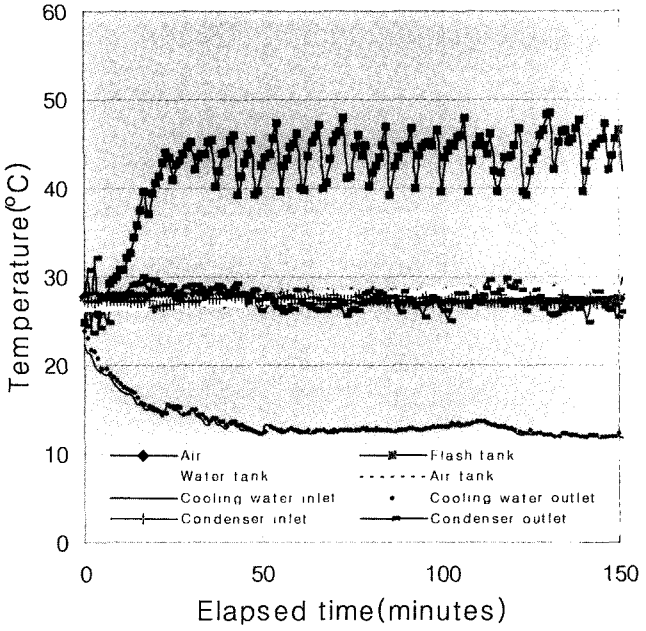


Fig. 4 Temperature history in the experimental system.

치로서 냉각수입출구온도는 그림 하단의 원형심볼과 검은실선으로 표시되어 있으며, 전체적인 실험기간 중 12~14℃ 범위를 나타내었다. 물탱크내부는 반복된 사이클에도 불구하고 예상보다 높지 않았으며 이로 인해 펜탄의 물탱크내 응축이 증가한 것으로 판단된다. 이는 단열의 추가와 사이클의 반복으로 어느 정도 회복될 것으로 판단된다.

다. 압력의 변화

실험장치 내의 압력변화를 살펴보면 그림 5에 나타낸 바와 같다. 기액분리탱크 내의 압력은 밸브를 열기까지 복사가열에 의해 상승하다가 밸브를 열면 증기의 배출로 인해 압력이 하강하여 그 범위는 110~150 kPa로 나타났다. 물탱크 내의 압력은 93~130 kPa로서 양수되는 물의 수두와 응축기밸브가 닫혀 물피스턴의 이동이 정지되는 위치에 의해 결정되었다. 즉, 정(正)의 압력과 부(負)의 압력인 진공의 압력 사이를 반복하였다. 한편, 응축기 내부의 진공압은 절대압으로 약 70 kPa 정도를 나타내었으며, 사이클을 반복하는데 아무 문제가 없었다. 즉, 그 진공에 의해 물탱크내로 물피스턴을 원위치시켜 바닥탱크내로 물을 흡입하여 사이클을 반복할 수 있었다.

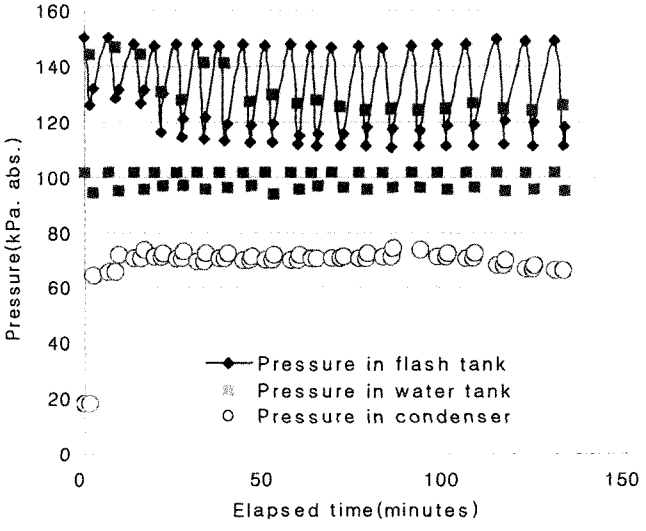


Fig. 5 Pressure history in the elements of the experimental system.

라. 물탱크효율

작동물질이 물탱크 내에서 응축하는 현상은 그림 6에 나타낸 바와 같다. 그림은 실험이 계속되는 동안 물피스톤의 체적변화를 나타낸 것으로 물피스톤의 체적은 물탱크와 공기탱크내의 물의 양으로 계산되는데 이것은 실험초기의 물과 응축된 작동물질의 합이다. 그림을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 그 체적이 증가하는 것을 알 수 있으며 이것은 작동물질 증기가 응축하기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 경향은 사이클이 더욱 계속되어 물탱크 내의 온도가 올라가면 온도차가 줄어듦과 동시에 물탱크 내의 응축된 작동물질이 다시 증발하게 될 것으로 예상되는 바 응축이 줄어들 것으로(Kwant, 1981) 보인다. 한편, 내부단열과 전열면적효과를 알아보기 위하여 내부단열과 외부단열이 된 직경 300 mm의 물탱크와 그렇지 않은 직경 150 mm의 물탱크를 이용하여 실험, 작동물질 정도를 측정한 결과 응축의 정도는 그림 7과 같이 나타났다. 물피스톤의 체적은 실험기간내에 두 경우 모두 물피스톤 초기체적의 96~106% 범위내에 존재하였으며, 시간이 갈수

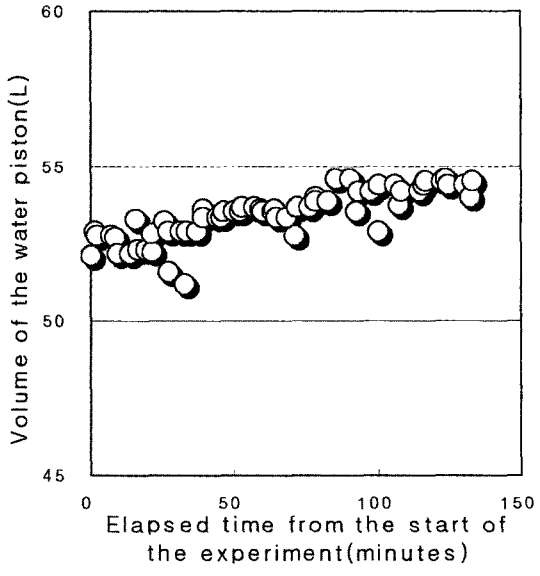


Fig. 6 Volume of the water piston depending on the elapsed time.

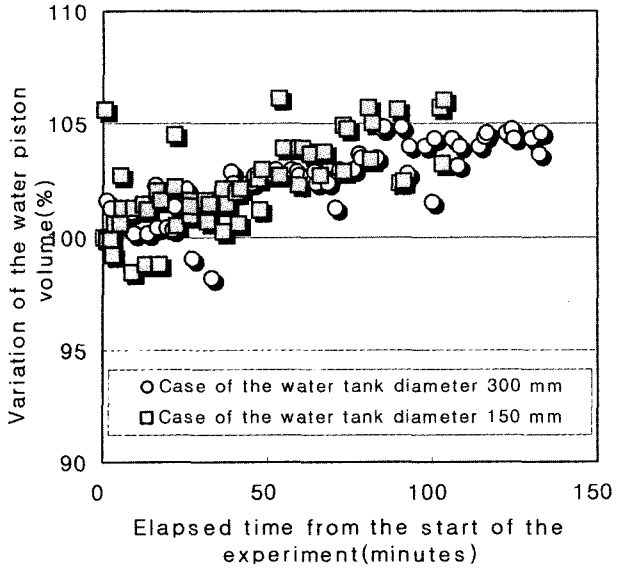


Fig. 7 Variation of the water piston volume depending on time for the case of the water tank size.

록 체적이 증가하여 작동물질응축현상을 나타내었다. 직경이 큰 300 mm인 경우 내부단열과 외부단열을 실시하였기 때문에 응축의 속도가 150 mm 직경의 경우에 비해 비교적 완만하게 증가함을 알 수 있었으며, 이는 직경이 커지면서 전열면적이 증가하더라도 단열효과가 높기 때문으로 판단된다.

마. 공기탱크의 효율

공기탱크의 효율은 그림 8에서 보는 바와 같이 물피스톤의 체적변위가 증가할수록 직선적으로 증가하였다. 물피스턴이 공기를 압축하여 전양정에 상당하는 압력이 되면 양수하는데 그 상당압력이 될 때까지 물피스턴은 공기를 폴리트로픽(polytropic)압축하게 되는데 사이클반복에서의 공기온도가 앞서의 그림 4에서 나타난 바와 같이 크게 변하지 않으므로

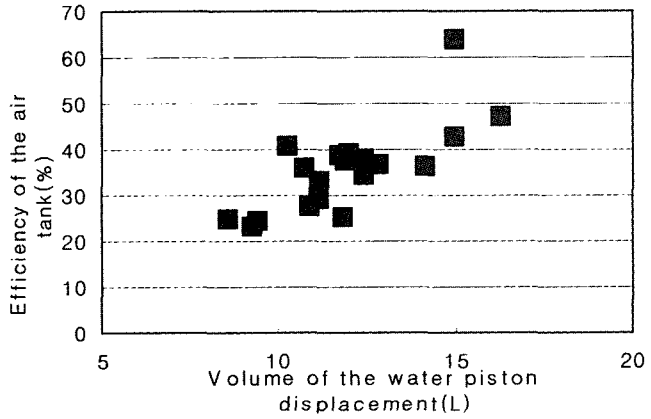


Fig. 8 Efficiency of the air tank depending on the volume of the air displacement in the air tank.

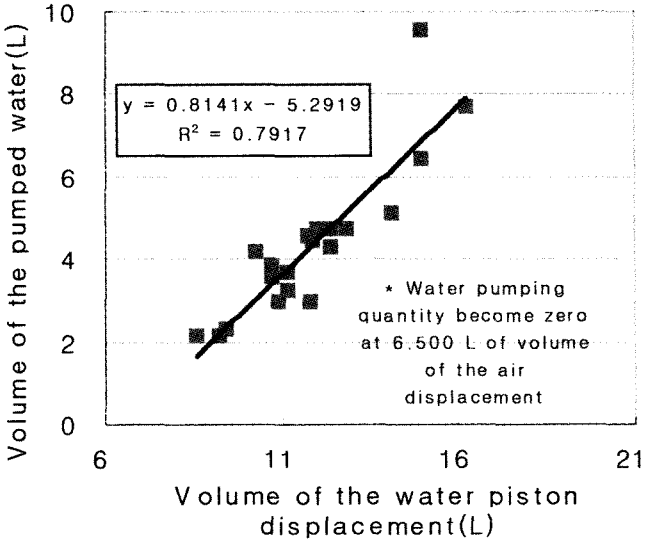


Fig. 9 Volume of the pumped water depending on the volume of the air displacement in the air tank.

상당압력이 될 때까지의 필요한 체적은 사이클마다 큰 차이가 없다고 할 수 있고 그렇게 볼 때 양수량이 증가하면 손실체적이 상대적으로 줄어드는 결과가 되므로 그림과 같이 양수량이 증가하면 공기탱크체적이 증가하는 것으로 분석된다. 양수되는 물의 양은 그림 9에 나타낸 바와 같이 밀어올리는 공기의 양에 따라 약 2 L에서 10 L까지 나타내었으며, 직선적인 변화관계로 나타났다. 그림에 표시한 회귀식의 상관계수는 수위의 측정오차가 탱크직경의 크기에 따라 확대되는 정도에 따라 달라질 것으로 판단된다. 회귀식에서 물피스톤의 체적변위가 약 6,500 cc 이면 양수되는 물이 전혀 없게 되는데 이것의 의미는 적어도 이만큼의 변위 이상이 되어야 압축되는 공기량을 극복하고 양수가 이루어진다.

바. 응축기압력

응축기 내의 압력은 실험기간 중 약 70 kPa로 나타났으며 사이클을 반복하는데 문제가 없었다. 응축기내의 압력은 태양열 물펌프의 성능에 큰 영향을 주며, 응축기 성능이 부족하면 사이클이 형성되지 않게 된다. 즉, 응축기의 진공상태유지능력에 따라 바닥탱크로 물을 흡입하는 속도가 달라지게 되는데 이에 따라 그 성능을 분석하기 위하여 실험조건에 따라 여러 실험을 실시하였으며, 이때의 응축기내의 압력을 나타내면 그림 10과 같다. 본 실험의 경우는 그림에서 C조건을 나타내며, 그림을 살펴보면 실험에 따라 절대압력으로 약 60, 70, 90 kPa정도를 나타내었으며, 실험조건은 표 3에 나타난 바와 같다. 응축기내의 진공은 초기의 진공도와 사이클당 공급되는 작동물질증기의 량과 응축기의 냉각능력에 의존한다고 판단되며, 실험조건에 나타난 실험의 경우 사이클을 반복

Table 3 Pressure of pentane vapour in the condenser depending on the experimental conditions.

Case	Average pressure of pentane vapour in condenser (hPa abs)	Cooling water inlet temperature (℃)	Initial pressure in condenser (hPa abs)	Average pumped water quantity per cycle (cc)	Inner diameter of water tank (mm)	Insulation conditions
A	539.3	13.6	144	684	280	water tank insulation
B	813.4	11.77	120	358	280	water tank insulation
C	683.9	13.5	180	4366	330	water tank and condenser insulation

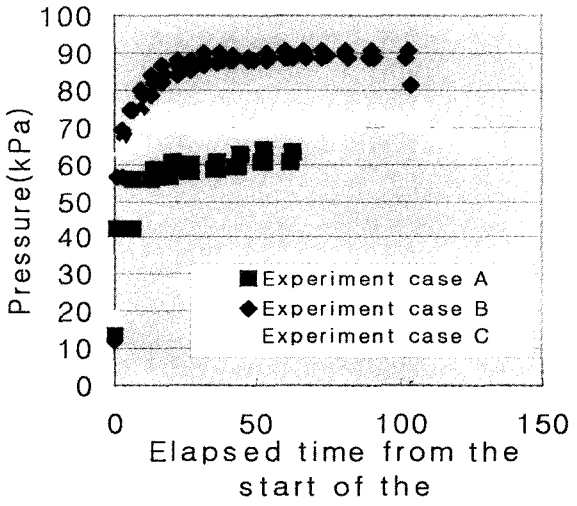


Fig. 10 Pressure history of the pentane vapour in the condenser.

하는 데에는 문제가 없었다.

4. 요약 및 결론

태양열을 동력원으로 하여 구동되는 물펌프는 자연에너지의 적극적인 이용측면에서 필요하며, 태양열이 강할 때 그 성능이 우수하고 이에 따라 많은 물을 공급할 수 있기 때문에 매우 이상적인 장치라 할 수 있다. 본 연구에서는 태양열 물펌프를 실현하고자 복사열로 구동하는 물펌프를 제작 실험 분석하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

가. 복사에너지를 동력으로 변환하여 물을 양수할 수 있었고 그 사이클을 반복할 수 있었다.

나. 양수는 약 2시간 10분 동안 20사이클을 반복하며 토출양정 157 cm에서 총 87,326 cc를 양수하였다. 양수량은 밸브개폐수준에 따라 사이클당 약 10 L에서 2 L 사이에서 양수되었으며, 사이클당 평균 4.366 L의 물을 양수하였다. 이 시간동안 복사열공급에 사용된 전력사용량은 2.1 kWh로서 시스템총에너지효율은 약 0.018 %로 나타났다.

다. 실험과정에서 기액분리탱크 내의 작동물질 증기의 온도가 가장 높았으며 그 범위가 40~49℃, 가장 낮은 온도는 응축기 냉각수공급위치로서 전체적인 실험기간 중 12~14℃ 범위를 나타내었다.

라. 기액분리탱크 내의 압력은 밸브 개폐에 따라 110~150 kPa로 나타났으며, 물탱크 내의 압력은 93~130 kPa로 나타났다. 응축기내의 압력은 약 70 kPa 정도의 진공으로서 사이클을 반복하는데 문제가 없었다.

마. 물탱크 내에서의 작동물질의 응축현상을 방지하기 위한 물탱크의 내부단열과 외부단열의 효과는 입증되었지만 실험에서 적은 량이지만 작동물질의 응축현상이 일어났다. 물탱크 내부가 고온으로 유지되면 방지될 것으로 판단되었다.

바. 공기탱크의 효율은 물피스톤의 체적변위가 증가할수록 직선적으로 증가하였다. 회귀관계식에서 볼 때 물피스톤의 체적변위가 약 6.5 L이상이 되어야 압축되는 공기량을 극복하고 양수가 이루어는 것으로 나타났다.

사. 한국의 전국 하루 평균 3.488 kWh/(m^2 · day)의 태양에너지를 기준으로 열효율이 0.1%인 경우를 적용하고 전양정을 10 m로 보면 태양열복사 단위면적 m^2당 약 128 kg의 물을 양수할 수 있을 것으로 예상된다.

1. Al-Haddad, A. A., E. Enaya, M. A. Fahim. 1996. Performance od a thermodynamic water pump. Applied thermal engineering Vol. 16, No. 4. :321-334.
2. Bhide V. C. 1975. Solar energy utilization in India and abroad. paper presented at the Nationa productivity council conference of industrial uses of solar energy. Madras, India.
3. Farber, E. A. 1974. Solar energy conversion research and development at the university of Florida. Building systems Design. February/March.
4. Homepage of the Korea Meteorological administartion. 2000.

http://www.kma.go.kr/index.jsp

5. Kim, Y. B. et al. 2002. Development of solar powered water pump-Energy conversion test and performance analysis- Proceedings of the KSAM 2002 Winter Conference. 7(1):167-172. (In Korean)
6. Kim, Y. B. et al. 2003. Development of solar powered water pump by using low temperature PCM -Optimal design of the system- Proceedings of the KSAM 2003 Winter Conference. 8(1):406-411. (In Korean)
7. Kim, Y. B. et al. 2003. Development of solar powered water pump by using low temperature PCM(II) -Equipment construction and experiments- Proceedings of the KSAM 2003 Summer Conference. 8(2):384-389. (In Korean)
8. Kim, Y. B. et al. 2004. Development of solar powered water pump by using low temperature PCM -Experimental Analyses-. Proceedings of the KSAM 2004 Summer Conference. 9(2): 349-352. (In Korean)
9. KSSE. 1991. Solar energy handbook.
10. Kwant KW, Rao DP and Srivastava AK. 1981. Experimental studies of a solar water pump. In: Proc. Int. Solar Energy Congress, Brighton, :1172-6.
11. McVEIGH J. C. 1977. Sun power. Pergamon press.
12. Rao R. Hariprakash. 1990. Theoretical and experimental investigations of a solar thermal water pump. PhD thesis. Dept of Mechanical Engng. Indian Institute of Technology. madras. India.
13. Sudhakar K. et al. 1980. Analysis and simulation of a solar water pump for lift irrigation. Solar Energy 24. 71.
14. Sumathy, K, A. Venkatesh and V. Sriramulu, 1994. Heat transfer analysis of a flat-plate collector in a solar thermal pump, Energy 19:983-991.
15. Sumathy K. 1999. Experimental studies on a solar thermal water pump. Applied thermal engineering Vol. 19 :449-459.
16. Tabor H. and L. Bronicki. 1964. Small turbine for solar power package. Proc. U. N. Conf. on New Sources of Energy. New York. Vol. 4.
17. Wong, Y. W., K. Sumathy. 2000. Performance of a solar water pump with ethyl ether as working fluid. Renewable energy 22:389-394.