태양열을 동력원으로 한 물펌프 연구개발(II)
-장치설계와 양수실험-
Development of solar powered water pump(II)
-Equipment design and water pumping experiments-

김영복*	이양근**	이승규*	김성태*	나우정*	정병섭*
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
Y. B. Kim	Y. K. Lee	S. K. Lee	S. T. Kim	W. J. La	B. S. Jung

1. 서론

자연에너지이면서 자원이 풍부한 태양에너지를 동력으로 변환하여 얻어진 기계적인 일을 이용하여 물 펌프를 구동하면 이 장치는 물이 매우 필요한 때인 여름철의 경우 그 동력원인 태양열이 강하기 때문에 아주 이상적인 장치라고 할 수 있다. 이 장치는 특히, 전기가 잘 공급되지 않는 농촌의 경우 아주 유용하게 사용될 수가 있을 것이다.

이와 관련한 국내연구로는 김 등(김, 2002)에 의한 상변화물질의 증기압을 이용한 물펌프 장치의 에너지변환실험과 작동사이클 과정에서의 열역학적인 해석을 통한 성능분석이 있다. 국외에서는 Rao 등(Rao, 1990)에 의한 n-pentane을 이용한 실험연구가 있는데 Rao는 이 연구에서 장치 열효율이 낮고 예측치와 실측치의 오차가 매우 크다고 하였으며, 이를 개선하기 위해 작동유체의 온도와 압력을 제한하고 물펌프 용기의 크기를 적절하게 조절하므로서 성능향상을 도모하였다. 그리고 Sumathy(Sumathy, 1999)는 1 m^2의 평판형 태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 펜탄을 이용하였으며, 양정의 수준에 따른 펌프구동사이클을 분석하였고, 전체적인 열효율 0.12-0.14 %를 나타낸다고 하였다. Wong 등(Wong, 2000)은 1 m^2의 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 에틸에테르를 이용하였으며, 양정 6-10 m일 때 하루 700-1400 l/day의 물을 양수할 수 있다고 하였고, 이것은 열효율 0.42-0.34 %에 상당한다고 하였다.

본 연구에서는 자연에너지인 태양열을 이용하여 물 펌프를 구동할 목적으로 작동물질 팽창관 냉각방법을 도입한 실험장치를 제작하여 가열과정에서의 물배출 실험, 냉각과정에서의 물흡입 실험을 실시하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

* 경상대학교 농업시스템공학부 생물산업기계공학전공, 경상대학교 농업생명과학연구원
** 상주대학교 기계공학부

※ 본 연구는 한국과학재단목적기초연구(과제번호 : R05-2001-000-01422-0) 지원으로 수행되었음

(1) 작동원리

작동물질 n-pentane의 증기압을 이용한 실험장치는 그림 1, 사진 1과 같다. 이 장치는 크게 가열부, 동력전달부, 흡입배출부로 나눌 수 있다. 가열부에서 적외선 램프를 이용하여 작동물질이 들어있는 용기를 가열하면 n-pentane은 액체에서 증기로 상변화하게 되고 기체는 배관을 따라 이동된다. 이동된 작동물질 기체는 그 증기압으로 인해 물을 밀게 되며 밀린 물은 동력전달부 배관 내를 이동하여 그 중간의 공기를 압축하게 된다. 이 중간의 공기통로는 흡입시의 부하를 줄이기 위한 것으로 대개의 경우 냉각 열유속이 가열 열유속에 비해 작기 때문에 공기통로를 둠으로서 그 부하를 줄이려는 것이다. 압축된 공기는 다른 쪽의 물을 밀어내게 되어 물을 양수하게 된다. 물을 양수하게 되는 흡입 배출부에는 실린더의 우측상향방향과 하향방향의 물통로에 각각 逆止밸브(Check valve)가 장치되어 있어 물을 상향으로 배출할 때는 상부밸브가 열리고 하부밸브는 닫혀 물이 위로 배출된다. 배출된 물이 위로 나와 냉각 열교환기부로 공급되면 가열된 작동물질 기체는 냉각되어 기체상태에서 액화되고, 체적이 줄어들게 된다. 이때 생기는 진공부압에 의해 물은 작동물질 방향으로 이동되고 동력전달부의 물과 공기 이동에 의해 상단의 역지밸브는 닫히고, 하단의 역지밸브가 열려서 물을 흡입하게 된다. 냉각시키기 위한 열교환기는 냉각유량이 증가할 경우에 대비해 그 면적을 확보하기 위하여 두 곳에 설치하였다. 냉각시키는 물이 열교환기를 통과하여 냉각이 종료되면 작동물질 용기내의 가열된 증기가 다시 이중관형 열교환기로 유입되기 시작하며 다음 사이클을 시작하게 된다.

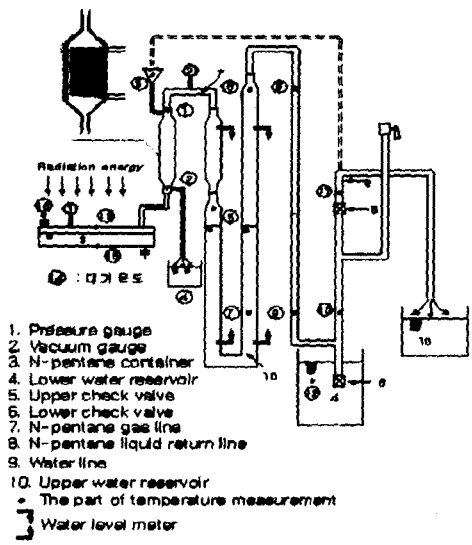
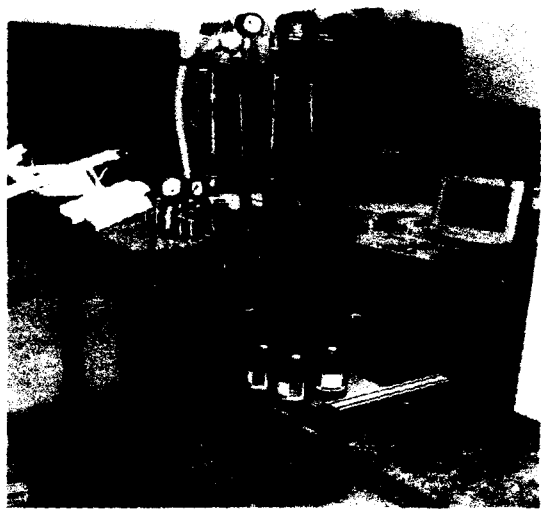


Fig. 1 Water pump system-heat exchanger type for experiments



Picture 1 View of experimental equipments system for water pumping

작동물질을 냉각하는 방법은 작동물질이 들어 있는 콘테이너부를 냉각하는 것은 면적이 넓

어 열량손실이 많고 태양열 가열이 계속되고 있기 때문에 기술적으로나 효율면에서 불리하다고 판단하고 작동물질 팽창관에 열교환기를 설치하여 냉각하였다. 열교환기는 이중관형으로서 내부에 나선형구리관을 배치하여 열교환면적을 최대한 넓히도록 하였다.

(2) 열유속을 고려한 설계

장치의 사이클을 구성하기 위한 열유속은 열역학 제1법칙에 따른 에너지보존관계식을 만족하여야 한다. 즉, 장치를 가열하거나 냉각하기 위해 공급되는 총열량 중 일부는 복사와 대류, 작동물질과 물 사이의 전열에 의해 빠져나가고 나머지가 작동물질을 가열하여 내부에너지를 상승시키고, 일로 변환된다. 사이클을 반복하기 위해서는 가열과정에서의 작동물질에 추가된 내부에너지를 냉각과정에서 냉각시킨 후 외부일을 하게 되기 때문에 가열과정에서의 내부에너지와 냉각과정에서의 내부에너지는 같아야 한다. 여기서 작동물질의 체적변화와 일과의 관계를 도입하고 이러한 관계를 이용하면 가열과 냉각관계에서 냉각열유속은 일정한 크기 이상이 되어야 하는 것을 알 수 있다. 각 값을 양의 값으로 하여 그 관계를 수식화 하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$Q_{heat} = \Delta U_h + W_h, \quad Q_{cool} = \Delta U_c + W_l, \quad \Delta U_h = \Delta U_c \quad \text{---------- (1)}$$

위 식에서 흡입부의 일이 배출부의 일보다 작아진다면 그만큼 냉각열유속은 작아도 될 것이다. 이것은 장치설계에서 흡입부의 일이 작아지도록 물콘테이너의 위치를 가능한 한 낮은 위치에 배치하는 것이 좋다는 것을 나타내 주며, 중간 동력전달부에서도 흡입시의 위치에너지가 작아지도록 설계되어야 한다는 것을 알 수 있다.

나. 열원공급장치 및 계측장치

실험장치에는 고온열원으로서 복사에너지를 공급하기 위한 방법으로 적외선 램프(185W)를 설치, 조합하여 가열하였으며, 복사에너지의 수준을 조절할 수 있도록 배치하였다. 2000년 우리나라 평균일조시간을 기준으로 평균태양강도를 계산하면 0.6 kW/m^{2}인데 비해 면적을 고려할 때 가열강도가 약간 높은데 확실한 결과를 확인하기 위하여 강도수준을 높게 책정하였다. 그러나 작동물질 단위질량당 공급열량은 전열면적에 따라 달라지므로 필요한 가열강도는 면적설계를 통하여 조절할 수 잇게된다. 그리고 저온열원으로서 작용하게 되는 물의 온도수준에 따른 성능을 분석할 경우를 고려하여 물의 온도수준을 조절할 수 있는 냉수제조장치를 설치하였다. 실험과정에서 온도, 압력, 양수량 등을 측정하기 위하여 각각 T type 열전대를 사용한 다점온도측정 기록시스템, 고압·진공압력계, 저울 등을 이용하였다.

다. 실험방법

실험방법은 고온열원공급으로서 적외선 램프의 수를 2개에서 4개까지 조절하여 가열함으로서 가열수준을 다르게 하였다. 가열과 냉각과정은 특성분석을 위하여 그 과정을 분리하여

각각의 실험을 실시하였으며, 그 과정에서의 여러 제반 변화특성을 따로 분석하여 연속 사이클 구성의 자료를 확보하고자 하였다. 실험과정에서 측정항목은 각 점의 상태와 현상을 분석하기 위해 작동물질 각부의 온도, 물과 공기의 온도를 측정하였으며, 그 측정점들은 그림 1에 나타낸 바와 같다. 그리고 작동물질과 장치내부의 압력을 측정하였으며, 양수되는 물의 양을 시간에 따라서 계측하였다. 양정은 장치의 동력변환부의 배관으로부터 상향배관 최상단까지의 거리를 기준으로 3수준으로 하였으며, 각각의 실험수준 조합을 다음과 같이 하여 비교하였다.

Table 1 Combination of the experimental conditions

Water head(cm) / No. of lamp	50	80	120
2	L2-H50	L2-H80	L2-H120
4	L4-H50	L4-H80	L4-H120

3. 결과 및 고찰

가. 작동물질과 물의 온도변화

작동물질을 가열하는 과정에서 작동물질과 물, 주위온도의 변화를 살펴보면 장치그림 2번 위치의 작동물질의 온도, 즉, 작동물질 증기의 온도를 살펴보면, 실험조건에 따라 약간씩의 차이는 있으나 가열시작 후 약 7~10분 후 최고온도에 달하며, 60~70 ℃ 정도가 된다. 실험조건 L2-H50의 경우 그림 2에 나타나 있는데 가열시작 후 약 8분이 경과하면 2번 위치의 작동물질 온도가 급상승하기 시작하여 약 10분이 경과하면 약 60 ℃ 이상의 온도에 도달하게 된다. 이것은 작동물질 증기가 활발하게 발생하는 시기로 판단되며, 냉각을 시작하면, 약 40 ℃까지는 온도가 급속하게 하강하다가 이후 완만하게 내려가는 것을 알 수 있다.

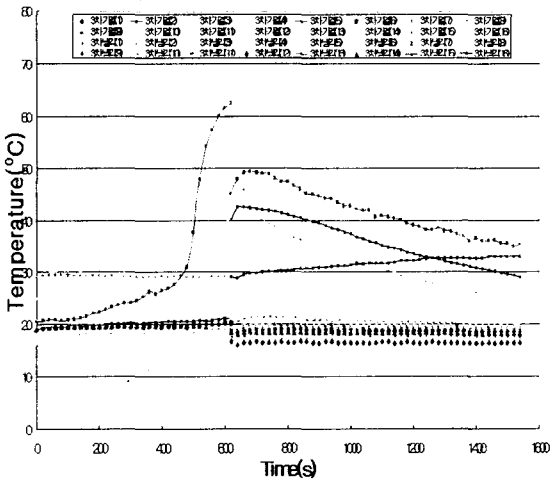


Fig. 2 Temperature history depending on time for L2-H50 condition

나. 압력의 변화

작동물질을 가열 냉각하는 하는 과정에서 작동물질 용기내의 압력변화를 살펴보면 실험조건 L2-H50의 경우 그림 3에 나타나 있다. 압력은 게이지압으로서 가열을 시작하면 압력이 상승하기 시작하여 L2의 경우 약 11~15분이 경과하면 최대압력에 이르게 되지만 L4의

경우 약 10분 정도 경과하면 최고압력에 이르게 되었다. 최고압력의 크기는 L2의 경우와 L4의 경우 비슷하게 나타나지만 양정에 따라서는 다르게 나타났다. 즉, H50와 H120의 경우를 비교하면 양정이 각각 50 cm, 120 cm의 경우로서 최고압력이 각각 15~20 kPa.gauge, 20~30 kPa.gauge의 범위로 나타났는데 이것은 양정에 따라 수압이 높아지기 때문에 당연한 결과로 판단된다. 내부압력은 연속 사이클을 형성하게 되면 일정범위에서 작동하게 될 것으로 판단되는데 이 위치는 냉각을 시작할 때의 압력이 된다. 압력은 가열량이 양정과 물의 평형에 따르는 양수일에 비해 충분하기 때문에 가열이 계속되면 지속적으로 상승하는 것을 알 수 있었으며, 이것은 공급에너지와 일, 주변으로의 손실에너지가 평형상태가 되면 일정한 상태를 유지할 것으로 판단된다.

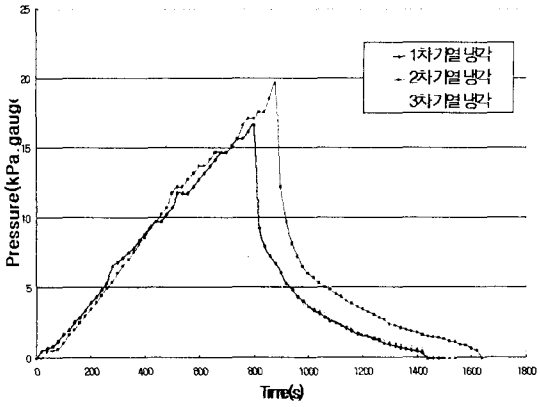


Fig. 3 Pressure history depending on time for L2-H50 condition

다. 양수량의 변화

작동물질을 가열 냉각하는 과정에서 작동물질이 팽창 응축하여 물을 배출 흡입하는 과정에서 실험조건 범위에서 100~500 g 정도의 양수량을 나타내었으며, 양수속도도 가열과 냉각 열유속에 따라 다르게 나타났다. 가열과 냉각에 소요되는 시간을 모두 고려할 때 전 실험조건 범위에서 한 사이클을 마치는데는 30분을 넘지 않았다. 실험조건 L2-H50의 경우의 양수량변화를 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. 반복실험에서 배출량은 133, 198, 176 g, 흡입량은 206, 263, 262 g으로서 실험간 편차가 비교적 크게 나타났으나 이러한 편차는 사이클이 형성되면 균일해질 것으로 판단된다. 배출의 속도와 흡입의 속도는 비슷한 경향을 보이며 변하는 것을 알 수 있었다. 배출되는 물의 양과 흡입되는 물의 량은 장치의 크기와 공급 열유속에 따라 달라지게 되므로 충분히 그 량을 조절할 수 있을 것으로 판단되었다. 사이클을 형성하기 위해서는 가열속도와 냉각속도는 다르더라도 배출량과 흡입량은 같아야 하므로 장치크기의 설계에서 가열량과 냉각량을 고려해야 함을 알 수 있으며, 이 결과를 토대로 장치수정과 사

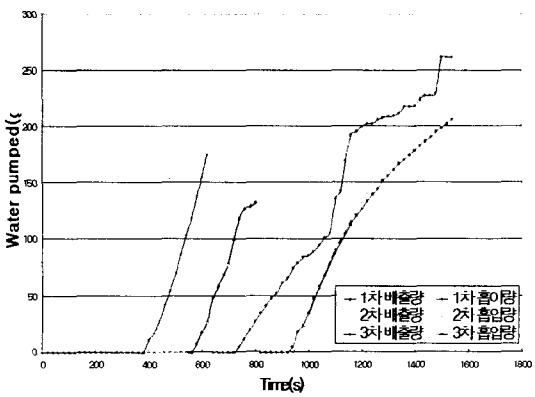


Fig. 4 Water output and input from/to water container depending on time for L2-H50 condition

이클구성이 가능할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 자연에너지인 태양열을 이용하여 물 펌프를 구동할 목적으로 n-pentane을 작동물질로 하는 열동력 물펌프를 설계 제작하여 가열 냉각과정에서의 온도, 압력, 양수량을 측정 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 장치설계에서 물의 흡입을 위한 냉각열량은 태양열 가열능력에 비해 약하므로 흡입을 위한 진공압이 약하여 흡입동력이 약하게 되므로 이를 고려하여 물콘테이너부로 흡입되는 흡입양정을 적게 하는 방법으로 설계되어야 하며, 이를 위해 물콘테이너는 가능한 낮게 배치하고, 중간동력전달부에서는 공기를 이용하는 방법이 필요한 것으로 해석되었다.

2) 작동물질 증기배출부에서의 온도가 가장 높게 나타났으며, 실험조건에 따라 약간씩의 차이는 있으나 가열시작 후 약 7~10분 후 최고온도에 달하며, 60~70 ℃ 정도가 되었다. 작동물질 용기 내의 작동물질의 온도는 가열과 냉각과정에서 약 29~40 ℃ 범위에서 변하는 것을 알 수 있었는데 이것은 상변화온도범위에서 포화상태를 유지하고 있는 것으로 판단되었다.

3) 양수량은 실험조건 범위에서 100~500 g 정도의 양수량을 나타내고 있으며, 어떤 경우도 한 사이클을 마치는데는 30분을 넘지 않았다. 사이클을 형성하기 위해서는 가열속도와 냉각속도는 다르더라도 배출량과 흡입량은 같아야 하므로 장치크기의 설계에서 가열량과 냉각량을 고려해야 함을 알 수 있으며, 이 결과를 토대로 장치수정과 사이클구성이 가능할 것으로 판단되었다.

4) 작동물질의 최고압력의 크기는 가열량에 따라서는 비슷하게 나타나지만 양정에 따라서는 수압이 달리지기 때문에 다르게 나타났는데 공급에너지와 일, 주변으로의 손실에너지가 평형상태가 되면 일정한 상태를 유지할 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. 김영복, 이양근, 이승규, 김성태, 정병섭. 2002. 태양열을 동력원으로 한 물펌프 연구개발-에너지변환실험과 성능해석- 한국농업기계학회 2002 동계학술대회 논문집. pp.167-172
2. 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.
3. Sumathy K. 1999. Experimental studies on a solar thermal water pump. Applied thermal engineering Vol. 19, pp. 449-459.
4. Wong, Y. W., K. Sumathy. 2000. Performance of a solar water pump with ethyl ether as working fluid. Renewable energy 22. pp. 389-394