

태양열을 동력원으로 한 물펌프 연구개발

- 에너지변환실험과 성능해석 -

Development of solar powered water pump

- Energy conversion test and performance analysis -

김영복*	이양근**	이승규*	김성태*	정병섭*
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
Y. B. Kim	Y. K. Lee	S. K. Lee	S. T. Kim	B. S. Jung

1. 서론

태양열을 동력원으로 한 물 펌프는 태양에너지를 동력으로 변환하여 얻어진 기계적인 일을 이용하여 물 펌프를 구동하는 것이다. 이러한 장치는 물이 아주 필요한 때인 여름철의 경우 그 동력원인 태양열이 강하기 때문에 이상적인 장치라고 할 수 있다. 특히, 전기가 잘 공급되지 않는 농촌의 경우 아주 유용하게 사용될 수가 있을 것이다. 한국의 전국적인 태양열 일사량을 일년 평균치로 계산하면 서울을 제외하고는 전국이 하루 약 3.488 kWh/m².day 정도의 일사에너지를 받고 있는 것으로 보고되고 있으며²⁾, 2000년 우리나라 지역의 평균 연간 총 일조시간은 약 2,112시간이며¹⁾, 하루 평균 일조시간은 5.786 시간으로 나타났다. 이 평균일조시간을 기준으로 평균태양강도를 계산하면 약 0.6 kW/m²이 된다. 태양열을 이용한 물 펌프로서 Bernard Foret Belidor⁴⁾는 최초의 태양열 물 펌프라 할 수 있는 장치를 개발하였는데 공기를 작동물질로 이용한 방법으로서 하루 중 낮에 가열되고 밤에 냉각되면 한 사이클로 가동되기 때문에 물의 양이 많지 않은 단점이 있고, 작동유체로서의 구형용기에 가열되는 열량이 그 아래에 있는 물로 전달되기 때문에 작동물질 가열 열량이 줄어들게 되어 장치효율이 현저하게 낮은 단점이 있다. 한편, 저온에서 액체-기체 상변화하는 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 양수하는 방법으로서 Sumathy⁵⁾는 n-pentane을, Wong 등⁶⁾은 에틸에테르를 이용하여 연구한 바 있다. 그런데 Belidor형과 같이 공기를 작동물질로 하는 것은 사이클횟수가 적을 뿐만 아니라 가열에너지의 일부가 물에 흡수되어 열효율이 너무 낮아지는 단점이 있고, 터빈 구동형과 응축 냉각부가 분리되어 있는 것은 장치가 복잡하고 제작비가 많이 드는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 여러 단점을 보완한 실용형으로서 작동물질이 동일 용기 내에서 액체-기체 상변화 하도록 하고, 그 증기압으로서 물을 양수하도록 하여 장치가 간단하도록 하고, 가열에너지가 양수되는 물에 흡수되지 않도록 구조를 개선하는 방식을 채택하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 작동물질에 공급된 열에너지가 일로 변환되는 과정에 대한 에너지변환실험을 실시하였으며, 이를 근거로 태양열물펌프의 성능에 대한 분석을 수행하였다.

* 경상대학교 농업공학부 농업기계공학전공, 경상대학교 농업생명과학연구원

** 상주대학교 기계공학부

※ 본 연구는 한국과학재단목적기초연구(과제번호 2001-1-31600-002-1)지원으로 수행되었음

2. 재료 및 방법

가. 에너지변환실험장치

태양열물펌프를 작동시키기 위한 작동물질로서 액체와 기체의 상변화온도가 적당하고 부식이나 독성이 없으며, 열적으로 화학적으로 안정되어 있는 n-pentane을 선정하여 그 상변화과정에서의 에너지변환실험을 하기 위하여 구성한 실험장치는 그림 1과 같다. 그림을 살펴보면 작동물질은 철판으로 만든 용기 속에 들어 있으며, 초기에 2.5리터의 n-pentane(98% purity)를 충전하였다. 작동물질용기의 내부에는

하단으로 작동물질의 증기가 팽창할 수 있도록 파이프로 연결되어 하단의 팽창주름관(bellows)으로 연결되어 있다. 주름관의 하단에는 팽창변위를 흡수할 수 있도록 스프링을 연결하고 그 하단에 저울을 설치하여 작동물질의 팽창에 의한 힘이 어느 정도인가를 측정하고 그 과정에서의 작동물질의 압력과 온도 체적을 측정, 분석하였다. 스프링상수는 계측에 의해 약 1280 N/m로 나타났다. 작동물질에 열을 공급하기 위한 방법으로 적외선 램프를 설치하여 가열하였으며, 냉각은 램프를 끄고 자연냉각에 의하였으며, 이 과정에서 열에너지가 일로 변환되는 과정을 분석하고 작동물질의 압력과 변위에 따라 물을 양수할 수 있는 가능성을 판단하였다.

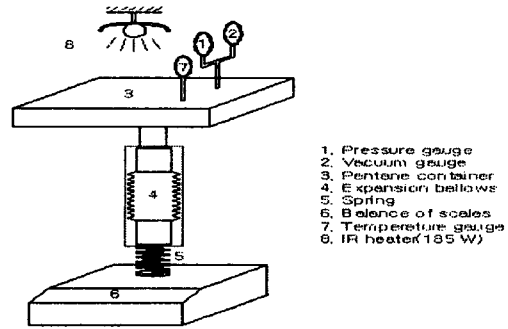


Fig. 1 Configuration of experimental equipments for energy conversion test

나. 실험방법

실험방법은 적외선 램프를 켜서 가열하면서 작동물질의 온도, 압력을 측정하였으며, 이 과정에서 스프링변위와 저울하중을 읽어 들여 작동물질의 체적변위를 계산하고, 일을 계산하는데 이용하였다. 냉각은 자연냉각을 하였으며, 측정은 1분 간격으로 측정하였다.

다. 작동물질의 특성

작동물질로 선택된 n-pentane은 액체-기체 상변화온도 36.1 °C, 증발잠열량은 표준대기압 상태에서는 358 kJ/kg으로 나타난다³⁾. 그런데 증발잠열량은 포화온도에 따라 달라지는데 그 관계는 Clapeyron 방정식으로부터 유도된 관계식으로 구할 수 있으며⁷⁾, 문헌의 주어진 자료를 이용하여³⁾ 상수 값들을 구하여 정리하면 다음과 같다. 이 식에서 P와 P_c(Pa)는 작동물질의 압력과 임계압력이며, LH(kJ/kg)는 증발잠열량, R(J/kg °K)은 기체상수, T(°K)는 온도를 나타낸다.

$$\ln(P/P_c) = 6.546 - LH/(RT) \dots\dots\dots (1)$$

작동물질은 열을 받아 가열되어 팽창하고 냉각되어 응축하면서 체적변화가 일어나는데 이 과정은 포화상태에서 주로 일어나게 되는데, 그 이유는 포화온도에서 최대 일의 크기가 증가하기 때문이다. 따라서 포화상태에서의 비체적의 변화를 분석할 필요가 있는데 이것이 체적변화로 연결되어 일로 변화되기 때문이다. v''를 포화액의 비체적, v'''를 포화증기의 비체

적(m^3/kg)이라 하면 그 관계는 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있는데 이것은 대응상태의 법칙(law of corresponding states)으로 받아들여지고 있다.

$$[LH_v/T_c] / [P(v''' - v'')/T] = 5.4 \quad \text{for } 0.5 < T/T_c < 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

이 방정식에 작동물질의 임계온도와 포화압력, 그리고 포화온도에서의 증발잠열량을 입력하면 증발에 따른 비체적의 변화를 계산할 수 있다. 이 변화를 이용하면 작동물질이 양수하는 압력에서 포화상태에서 증발하는 과정에서 얼마나 팽창하는가를 예측할 수가 있으며 이것을 이용하여 팽창일을 계산할 수가 있다. 작동물질이 팽창하여 물을 양수하기 위해서는 압력과 체적변위를 수반하여야 하는데 이때 작동물질이 포화상태일 때 그 압력과 온도의 관계를 알아야 물의 양정과 일의 관계를 분석할 수가 있게 된다. 작동물질의 포화온도 $T(^{\circ}K)$ 와 포화압력 $P(Pa)$ 의 관계를 잘 만족시키는 방정식으로서 Antoine 방정식이 있으며, 이 관계식을 만족하는 n-pentane의 방정식은 온도범위 $-35^{\circ}C \sim 80^{\circ}C$ 에서 다음과 같다.

$$\text{Log}(P \cdot 760/101300) \times = 6.85221 - 1064.63/[T - 41.15] \quad \dots\dots\dots (3)$$

라. 예상 사이클선도

물을 양수하는 과정에서의 작동물질의 상태변화에 대한 사이클선도는 그림 2와 같다. 과정 1-2-3-4-5는 가열과정으로서 1-3과정은 작동물질의 압력이 물을 상승시키기에는 압력이 미치지 못하여 정적상태에서 가열되면서 압력이 상승하는 과정이며, 3-4-5과정은 작동물질의 압력이 물의 양정에 상당하는 압력에 도달하여 정압상태에서 증발잠열을 받아 작동물질이 팽창하면서 물을 상승시켜 양수하는 과정이다. 가열과정에서의 가열량은 정적과정에서는 과정의 시작과 종료점의 평균비열값과 그 온도차를 이용하면 구할 수 있고, 정압과정에서의 증발팽창에서는 Clapeyron 방정식으로부터 유도된 식을 사용하면 구할 수가 있다. 과정 3-4-5에서 물을 양수하는데 사용되는 일의 크기는 그림에서 살펴보면 면적 1-2-3-4-5-6-7-8-1에 해당하는데 작동물질의 팽창에 의한 체적의 팽창과 그때의 압력의 곱으로서 결정된다. 그리고 과정 5-6-7-8-1의 과정은 냉각과정에 해당하는데 작동물질이 양수한 물과 주위 대기에 의해 냉각되어 원래의 상태로 돌아가는 과정이다. 작동물질의 냉각은 상태점 3번에서 양수되기 시작한 물이 배출 통로를 따라서 가열부에 도달하여 냉각이 시작되는데 냉각의 시작점은 양수된 물의 배출통로 길이를 조절하므로써 가능할 것이다. 냉각과정을 살펴보면 4번 점에서 냉각이 시작되면 작동물질은 응축을 시작하는데 이에 따라 작동물질의 압력은 하강하게 된다. 그러나 작동물질의 압력이 내려가더라도 곧바로 작동물질의 체적이 줄어들지는 않으며, 그것은 작동물질의 체적이 줄어들기 위해서는 그것과 연결된 물용기부의 체적이 늘어나야 하는데, 물용기의 체적은 하향파이프에 연결된 파이프로부터 하단의 물을 흡인할 만큼의 진공압력이 되지 않으면 체적이 늘어날 수 없기 때문이다. 즉, 물용기 내부가 팽창하는 과정에서 진공압이 형성되면 상향체크밸브는 닫히고 하향체크밸브는 열려서 하단의 물을 흡인해야 하는데, 하단으로부터 물을 흡인하려면 그 수두에 상당하는 진공압력이

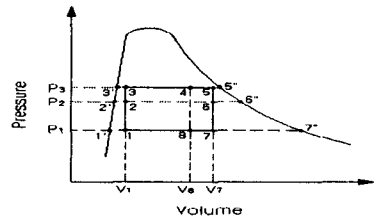


Fig. 2 Cycle diagram of pressure and volume of operating fluid

되어야 하기 때문이다. 따라서 작동물질의 압력이 하단의 물을 흡인할 수 있을 정도의 압력이 되면 작동물질이 응축되면서 물을 흡인하게 된다. 이 과정에서 냉각시킨 열량은 물을 흡입하고 작동물질의 내부에너지를 낮추는데 주로 사용된다. 사이클 중의 양수량은 사이클 중의 작동물질의 체적변화량인 3번 상태점과 5번 상태점 사이의 체적차이에 상당하는 만큼 양수하게 되는데, 이것은 작동물질용기와 물용기의 압력변환, 즉 양정변화가 있게 되면 그에 따라 유량이 변하게 된다.

마. 엑서지

작동물질이 열을 일로 변환하는 과정에서 최대 어느 정도의 일로 변환할 수 있는 것인가를 알기 위해서는 최대일, 즉, 엑서지(exergy)를 계산해 보면 되는데 최대일은 고온열원과 저온열원의 온도만으로 계산되는 카르노 열효율과 가열과정에서의 공급열량을 곱해주면 산출된다. 본 연구에서는 작동물질로서 n-pentane과 ethylether를 선택하여 저온열원 20℃와 고온열원 45℃까지 가열 냉각되는 과정에서의 최대일의 변화와 각 온도마다의 엑서지 증가를 계산하여 비교하여 봄으로서 작동물질의 선택과 작동온도범위를 결정하는데 도움이 되도록 하였다.

바. 사이클소요시간, 사이클횟수와 양수량

작동물질이 팽창과 응축을 반복하는데 소요되는 시간은 가열량과 냉각열량, 양수에 소요되는 위치에너지의 크기, 작동물질의 양 등에 좌우된다. 가열에 투입되는 에너지는 복사열이 작동물질용기의 상단을 통해 작동물질을 가열하게 되는데 열공급속도는 태양에너지의 강도와 전열면적, 작동물질의 온도와 양, 대기의 온도와 풍속 등에 따라 결정된다. 그리고 냉각에 필요한 열량은 양수된 물과 주변 공기에 의해 제공되는데, 그 공급속도는 양수된 물의 온도와 양, 주변공기의 상태, 전열면적 등에 따라 달라지게 된다. 한 사이클 구성에 소요되는 시간은 사이클당 가열량을 가열열유속으로 나눈 시간과 사이클당 냉각열량을 냉각열유속으로 나눈 값을 더해지면 되는데, 본 연구에서는 태양열복사열유속과 물에 의한 냉각열유속을 고려하여 가열열유속만을 150 W로 하였을 경우에 소요되는 시간을 기준으로 사이클소요시간과 이를 기준으로 우리나라 평균일조시간을 참조하여 하루 중의 사이클횟수를 산정하였다. 사이클횟수가 결정되면 하루 중의 양수량은 사이클당의 양수량과 사이클횟수를 곱하면 된다. 그런데 장치의 성능을 예상하기 위하여 사이클당의 양수량을 고정하고 이 체적을 작동물질의 체적변화를 통하여 얻을 때 양정에 따른 가열량과 양수일, 효율을 앞에서의 설명한 바대로 계산할 수가 있으며, 이를 통하여 장치성능을 해석해 볼 수가 있다.

사. 열효율

장치의 열효율은 작동물질에 투입된 에너지와 발생한 일의 비율로 정의되며, 투입된 에너지는 작동물질의 가열팽창을 위한 가열량과 냉각응축을 위한 냉각열량이며, 발생한 일은 장치로부터 물을 위로 상승시키는 일과 장치하단에 있는 물의 저수위로부터 장치까지 물을 끌어올리는 일이 된다. 이 과정에서 장치의 팽창과 응축에 따르는 마찰손실, 밸브의 개폐와 물의 유동에 따르는 배관 마찰손실 등이 있게 된다. 가열과정의 측면에서 이론열효율은 카르노 사이클 열효율을 계산하게 되고, 사이클 선도상 면적으로 살펴 본 열효율은 사이클선

도상의 일에 상당하는 면적을 투입에너지로 나누면 계산된다.

3. 결과 및 고찰

가. 작동물질의 경시별 온도, 압력, 체적, 힘의 변화

열에너지를 일에너지로 변환하는 과정을 확인하기 위해 작동물질을 가열, 냉각한 결과 그 과정에서의 작동물질의 상태변화는 그림 3에 나타낸 바와 같다. 그림을 살펴보면 온도는 가열초기의 297°K에서 냉각을 시작하기 직전의 324°K까지 상승하였으며, 압력은 게이지압력으로 0.132 Mpag 까지 상승하였다가 냉각을 시작함에 따라 하강하였다. 작동물질의 압력은 작동물질과 물탱크사이의 면적변환을 하지 않으면 이 작동물질의 압력 자체만으로도 약 13m의 양정을 담당할 수가 있는 것을 알 수 있다. 그런데 포화온도에 상당하는 온도변화에서 작동물질인 n-pentane이 액체에서 기체로 상변화하는 과정이 명확하게 나타나지 않고 약간 완만하게 상승하는 과정으로 나타났는데, 이것은 가열에 따라 내부의 압력이 그림에 나타난 것처럼 상승하기 때문에 그 압력에서의 포화온도가 점점 상승하기 때문으로 판단된다. 한편 작동물질의 체적변화와 그 과정에서 작동물질이 외부로 작용하는 힘은 스프링의 변위와 저울눈금 측정 결과를 이용하여 계산할 수 있으며 그 결과는 그림 4와 같다. 그림을 살펴보면 작동물질의 체적변화는 가열을 종료할 때에는 약 61.6 cm³이었으며, 이때의 저울눈금은 2.15 kg으로 나타났다.

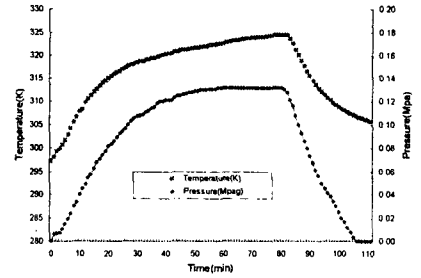


Fig. 3 Temperature and Pressure variation of the n-pentane depending on time during heating and cooling

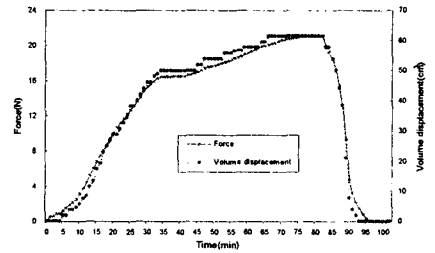


Fig. 4 Volume displacement and force of n-pentane depending on time

나. 작동물질의 엑서지분석

적절한 작동물질을 선택하고 선택된 작동물질의 온도작동범위를 결정하기 위해 n-pentane과 ethylether를 이용하여 열에너지를 일로 변환하였을 때의 최대일, 즉, 엑서지를 계산해 본 결과 그림 5와 같이 나타났다. 그림은 저 열원의 온도를 293.15°K(20 °C)로 하고 고 열원의 온도를 그 이상으로 변화시켜 갔을 때 최대일을 계산한 것으로 전체적으로 볼 때 비슷한 크기로 변해가고 있다. 작동물질별로 살펴보면 액체상태와 기체상태의 경우 각각 아주 완만하게 엑서지가 증가하다가 액체-기체 상변화 부근에서는 포화온도에서의 잠열량 공급으로 인해 엑서지가 급증하는 것을 알 수 있다. 이러한 변화를 기초로 하여 장치의 가동온도범위를 결정하기 위해 엑서지의 증가비율을 1°K(1 °C) 범위로 나누어 분석해 보면 그림 6과 같이 나타난다. 그림을 살펴보면 엑서지의 증가는 n-pentane이 36 °C 부근일 때 최대로 나타나게 되는데 이를 바탕으로 하

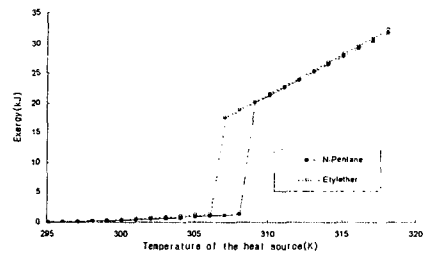


Fig. 5 Exergy variation depending on temperature of the heat source for the temperature of heat sink at 293.15 °K

면 작동물질을 n-pentane으로 하여 36 °C 전후에서 작동하도록 하면 최대일을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

다. 사이클횟수와 양수량 예측

양수량을 5리터로 고정하고 양정에 따른 사이클횟수와 양수량, 열효율을 계산하면 각각 그림 7로 나타났다. 양정이 증가하면 사이클횟수는 줄어들게 되고, 사이클당의 양수량이 일정하므로 하루 동안의 양수량은 줄어들게 된다. 사이클 횟수는 하루 양정 1m일 때의 201회에서 10m일 때의 45회로 줄어들게 된다. 이 과정에서 유량은 사이클당 유량이 일정하므로 같은 경향으로 변하게 된다. 그러나 효율은 양정이 크면 그 압력을 확보하기 위해 포화온도가 올라가기 때문에 고온열원의 온도가 상승하므로 인해 효율이 올라가게 된다. 가역사이클의 효율인 카르노 사이클 효율은 양정과 이에 따른 포화온도의 상승으로 직접적으로 증가하지만 사이클선도상의 효율은 양정이 증가할수록 상승기울기가 줄어들게 되는데 이것은 사이클선도 상에서 보듯이 포화온도에 따라 가열량이 달라지기 때문으로 판단된다.

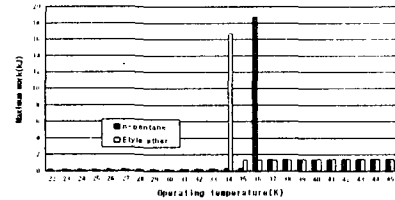


Fig. 6 Exergy variation rate of n-pentane and ethyl ether depending on temperature of heat source

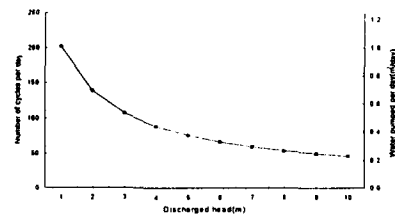


Fig. 7 Effect of discharged head on cycle numbers and water pumped per day for five liters per cycle

4. 적요

본 연구에서는 자연에너지인 태양열을 이용하여 물 펌프를 구동할 목적으로 n-pentane을 작동물질로 하는 열에너지의 동력변환 실험을 수행하고 작동물질의 온도, 압력, 힘을 측정, 계산하고 분석하였으며, n-pentane을 이용하면 양정 10m 이상은 충분히 양수할 수 있는 것으로 판단되었다. 작동물질의 엑서지를 분석하여 작동물질의 작동온도범위를 결정하여 예상사이클선도를 결정하였고, 양수량을 고정하였을 경우 사이클횟수와 하루의 양수량, 열효율을 계산하고 분석하였다.

5. 참고문헌

1. 기상청 홈페이지. 2002. <http://www.kma.go.kr/>
2. 한국태양에너지학회. 1991. 태양에너지핸드북.
3. Dreisbach R. R., Physical properties of chemical compounds-II, ACS.
4. McVEIGH J. C. 1977. Sun power. Pergamon press.
5. Sumathy K. 1999. Experimental studies on a solar thermal water pump. Applied thermal engineering Vol. 19, pp. 449-459.
6. Wong, Y. W., K. Sumathy. 2000. Performance of a solar water pump with ethyl ether as working fluid. Renewable energy 22, pp. 389-394
7. Zemansky M. W., et al, Heat and thermodynamics, Mcgraw-Hill, 1981, 255 page