

저온 상변화 물질 특성을 이용한 태양열 물펌프 실용화 연구 개발

-장치의 최적설계-

Development of solar powered water pump by using low temperature PCM -Optimal design of the system-

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

1. 서론

에탄올과 같은 저온 상변화물질의 팽창과 응축과정에서 발생하는 압력과 진공상태를 이용하여 물을 양수하는 물펌프는 태양열과 같이 에너지강도는 약하지만 그 자원이 무한하고 청정한 에너지를 이용하기에 매우 이상적인 장치이다. 이와 관련한 국내 연구로서는 김 등(2002)에 의한 펜탄의 증기압을 이용한 물펌프장치의 에너지변환실험과 작동사이클 과정에서의 열역학적인 해석을 통한 성능분석이 있다. 장치의 설계와 관련하여 Kwant 등(1981)은 작동물질의 응축액을 가열부족으로 되돌리기 위한 방법으로 응축부와 물탱크, 공기탱크를 분리하여 설계한 바 있고, 온도변화에 따른 탱크효율에 대해 분석하였다. 그러나 이 장치는 수동으로 작업을 해야 하는 불편이 있으므로 솔레노이드 밸브를 이용하거나 양수된 물의 수위, 탱크내의 압력 등을 이용하여 시스템의 작동으로 제어하도록 개선할 필요가 있다.

본 연구에서는 저온상변화물질을 이용하여 태양열물펌프를 실현할 목적으로 시스템의 각 구성요소의 최적설계를 수행하였다. 이를 통하여 장치의 각 구성요소간 균형을 도모함으로써 장치 효율을 높이고 자원의 낭비를 방지하게 될 것이다.

2. 재료 및 방법

가. 시스템 작동과 설계요건

태양열 물펌프(김, 2002)에서 물의 흡입과 배출 사이클은 자동으로 반복되어야 할 것이며, 작동물질과 물, 공기의 양과 상태변화, 그 이동이 양정과 양수량에 따라 효율적으로 설계되어야 한다. 시스템을 구성하는 탱크, 밸브, 파이프의 크기와 그 배치는 사이클이 랭킨사이클을 형성할 수 있도록 되어야 하며, 장치의 크기간에 논리적인 균형을 이루어야 한다. 이 과정에서 작동물질증기와 공기의 압력은 각각을 이상기체로 보고 기체의 상태방정식을 이용하여 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 탱크의 크기를 설계할 수 있다. 그리고 탱크를 연결하

* 경상대학교 농업시스템공학부 생물산업기계공학전공, 경상대학교 농업생명과학연구원

** 상주대학교 기계공학부

* 이 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업의 논문입니다.

는 파이프의 체적을 고려할 경우의 설계의 복잡성에 비해 파이프의 체적이 탱크체적에 비해 매우 적음을 고려하여 여기서는 탱크체적만을 고려하여 설계하도록 하였다.

나. 시스템 구성요소 및 작동원리

시스템의 작동요건과 설계요건에 따라 구성된 시스템은 연구의 결과이지만 설명의 편의상 여기서 그 장치를 살펴보면 그림 1과 같다. 그림 1에서 탱크 F는 작동물질 액체와 증기를 분리시키는 기능을 하며, 작동물질은 복사에너지를 받아 가열, 증발되어 탱크 F내의 압력이 상승하게 된다. 탱크 F의 압력이 상승하여 밸브 V_1 이 열리면 작동물질증기는 물탱크 W로 들어가며 탱크 내의 물을 밀어 공기탱크 A로 들어가게 한다. 이에 따라 공기탱크 A내의 공기는 압축되며, 그 압력이 양수할 물의 양정에 상당할 정도로 상승하게 되면 압축공기는 바닥의 탱크 B로부터 물을 밀어 올려 양수된 물의 저장탱크 S로 보내게 된다. 공기탱크 A가 물로 채워지게 되면 V_1 은 닫히고 V_2 는 열려 팽창 후의 작동물질 증기는 응축탱크 C에서 응축된다. 이로 인해 공기탱크 A내의 압력은 하강하고 생성된 진공으로 인해 최종적으로는 바닥탱크 B속으로 바닥의 물이 들어오게 된다. 이때 물탱크 W내에는 약간의 물이 응축하게 되는데 이 응축된 작동물질 액체는 그 밀도차로 인해 물 위에 뜨게 되며, 밸브 V_2 를 통해 응축탱크 C로 유도될 수가 있다. 공기탱크 A가 전부 공기로 채워지게 되면 밸브 V_2 는 닫히고 다음 사이클을 시작하게 된다. 응축탱크내의 응축된 작동물질 액체는 분리탱크 F내의 온도나 압력신호를 통해 받이 되어 시스템의 동작이 정지되는 것을 감지하여 그때 밸브 V_1, V_2, V_c, V_f 를 개방함으로써 분리탱크로 유도할 수가 있다.

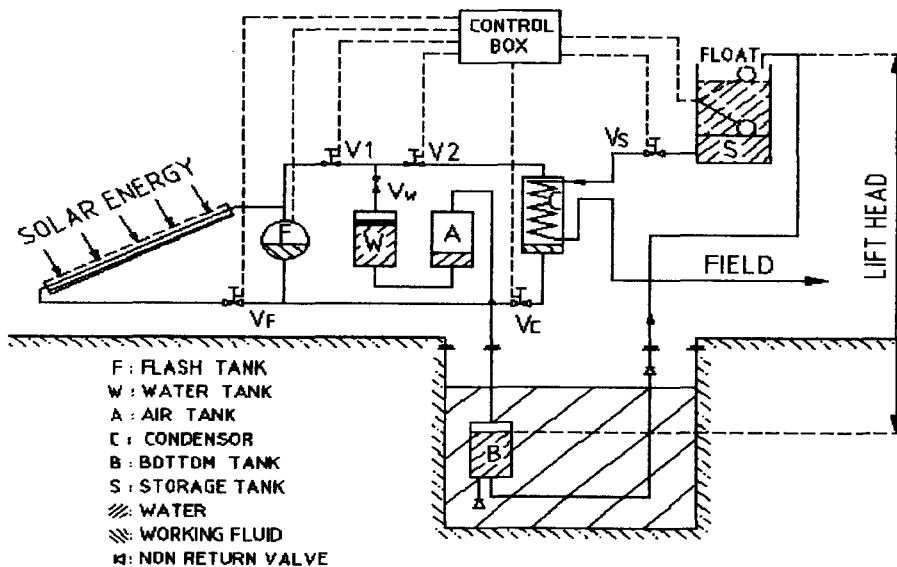


Fig. 1 Diagram of the solar water pumping system

다. 온도 및 압력

본 연구에서의 작동물질은 펜탄으로서 그 임의온도에서의 포화압력은 다음 관계식에서 구할 수가 있다(Sumathy, 1994)

$$p = -62.2334 + 0.68153 T - 0.0025393 T^2 + 3.2168E-6 T^3 \quad \text{----- (1)}$$

여기서, 온도 T와 압력 p의 단위는 각각 K, bar이다.

그리고, 공기탱크 A내 공기의 최종 압축압력은 양수할 물의 양정에 상당하는 압력이 되는데 그것은 게이지압력으로 볼 때 다음과 같이 계산된다.

$$P_{af} = \rho_w \cdot g \cdot H \quad \text{----- (2)}$$

단, P_{af} : 공기탱크 A내의 공기압축 후의 최종공기압력, ρ_w, g, H : 물의 밀도, 중력가속도, 양정

라. 탱크의 크기 결정

(1) 탱크 B

양수할 물 속에 잠겨 있는 탱크 B의 크기는 사이클당 양수할 물의 양 이상이 되어야 한다. 사이클당 양수할 물의 양이 너무 많으면 시스템 내에 공급해주어야 할 작동물질의 양이 너무 많아지고 사이클당 소요시간이 길어져서 열손실이 증가하게 된다. 사이클당 양수량이 너무 적으면 사이클당 소요시간이 너무 짧아져서 밸브를 연속 작동해야 하는 부담이 증가하게 되고 부드러운 운전이 되지 못하며, 부하손실도 커지게 된다. 양수하는 물의 체적을 V_p라고 하면 탱크 B의 체적 V_b는 양수체적 V_p에 따라 결정되며, 최소조건을 기준으로 보면 다음과 같이 결정된다.

$$V_b \geq V_p \quad \text{----- (3)}$$

(2) 탱크 A와 W

물탱크 W에는 사이클 물배출과정 말기에는 탱크 F로부터 들어오는 작동물질의 증기가, 물흡입과정의 말기에는 탱크 A로부터 되돌아오는 물이 차게 된다. 탱크 A에 들어 있는 공기의 압축과정을 물에 의한 냉각 등을 고려하여 이상기체의 등온변화로 보고 탱크 체적간의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$P_{ai} \cdot V_a = P_{af} \cdot (V_a - V_x) \quad \text{----- (4)}$$

$$V_w = V_b + V_x \quad \text{----- (5)}$$

$$V_a = V_w + V_{af} \quad \text{----- (6)}$$

$$V_a > V_b \quad \text{----- (7)}$$

단, P_{ai} : 탱크 A의 초기압력, V_w, V_a, V_b : 탱크 W, A, B의 체적

여기서 V_x는 탱크 A의 공기압력이 양수해야 할 양정에 상당할 때까지 탱크 W로부터 탱크 A로 들어온 물의 양이다. 이 V_x는 적더라도 파이프내의 공기가 압축되는 것을 고려하면

위의 관계로 나타난 것 이상이 된다. 공기탱크 체적 V_a 는 정해진 양정과 유량일 때에는 불필요하게 클 필요는 없으며, 공기탱크가 필요이상으로 크게 되면 압축해야 할 공기량이 증가하여 압축손실이 증가하게 된다. 위의 관계에서 방정식 (4)를 방정식 (5) V_w 는 방정식 (8)과 같이 정리되며, 물탱크내의 물이 공기탱크내를 채우고 넘쳐서 탱크 B로 들어가지 않도록 고려하면 방정식 (9)와 같이 수식화된다.

$$V_w = V_b + (1 - P_{ai}/P_{af}) \cdot V_a \text{ ----- (8)}$$

$$V_w \leq V_a \text{ ----- (9)}$$

방정식 (8)을 이용하여 양정과 사이클당 양수량의 수준에 따라 V_b 와 V_w 의 관계를 구할 수가 있으며, 그 범위에서 조건 방정식 (9)를 만족시키면 된다.

(3) 탱크 F와 C

작동물질의 기액분리탱크 F의 크기는 그 압력과 연관되어 있으며, 기액분리탱크로부터 작동물질의 증기가 물탱크 W로 들어갈 때의 과정을 물에 의한 냉각 등을 고려하여 등온과정으로 보면 다음과 같은 관계에서 구해진다.

$$P_{si} \cdot V_s = P_{sf} \cdot (V_s + V_w) \text{ ----- (10)}$$

이 식에서 P_{sf} 는 팽창 후의 압력으로서 양정에 상당하는 압력이며, 탱크내 물을 고려할 때 근사적으로 P_{af} 와 같다. 그리고 응축탱크 C의 크기는 하루 동안 응축된 작동물질이 들어 가야 하고 냉각수와 작동물질증기와의 열교환을 보장할 정도의 열교환부가 들어가도록 설계 되어야 한다. 여기서 열교환면적은 에탄올을 이용한 기본 연구에 의하면 구리파이프를 이용한 이중관형 열교환기에서 응축면적이 6 m^2 일 때 $20 \sim 30 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도의 열전달계수를 나타낸다고 하였다(Kwant, 1981). 응축액 체적 V_{cm} 은 하루 중의 사이클수 n 과 물탱크내의 작동물질증기가 응축되는 것과 작동물질증기 밀도 dog 를 고려하여 다음과 같이 구해진다.

$$V_{cm} = n \cdot V_w \cdot dog \text{ ----- (11)}$$

여기서는 실제적인 실용화장치의 작동조건과 실험실에서의 조건을 고려하여 $P_{ai}=1013 \text{ hPa}$, $P_{af}=1013 \sim 1993.45$ (양정 $0 \sim 10\text{m}$), $V_a=0 \sim 40$ 리터의 조건에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 양수 속도

기존 연구(Kwant, 1981)에 의하면 일조시간이 $8 \sim 14$ 시간, 복사에너지강도가 20 MJ/m^2 , 양정 10 m 의 조건에서 사이클당 15 kg , 하루 20사이클의 물을 양수할 수 있다고 하였다. 사이클의 가능성과 횟수, 양수량, 열교환능력 등을 예측하기 위해 예비적 양수실험을 실시한 결과를 분석하여 물의 배출과 흡입속도를 살펴보면 그림 2와 같으며, 이 때의 실험조건과 장치는 김(2002)의 연구에 나타난 바와 같다. 그림을 살펴보면 가열에 의해 물을 상승시키는 속도보다 냉각에 의해 물을 흡입시키는 속도가 느린 것을 알 수 있으며, 이것은 Sumathy(1996)에 의한 실험에서 배출과 흡입에 각각 2분, 3.5분이 소요된 것을 비교하면 동

일한 경향으로서 장치의 작동여건상 저열원의 온도와 열교환 시간에 따른 것으로 판단된다. 저열원은 일반적으로 지하수이므로 그 온도의 수준은 지역에 따라 결정될 것이며, 설계상으로는 열교환기에서 충분한 열교환 면적과 열교환 시간이 확보되도록 해야 할 것이다. 이를 위하여 냉각수의 열교환기내 체제시간을 증가시키는 등의 방법을 도입해야 함을 알 수 있다. 한편 복사열강도는 배출속도에는 비슷한 강도로 영향을 주지만 흡입속도에는 그 만큼의 영향을 주지 않는데 이것은 배출말기의 작동물질 증기상태가 두 경우 비슷할 것이므로 당연한 결과라 할 수 있을 것이다.

나. 양정과 양수량 수준에 따른 탱크의 크기

양정과 양수량의 수준에 따라 탱크 B와 W의 크기를 알아보면, 양정 1 m의 경우 그림 2, 양정 10 m의 경우 그림 3과 같다. 양정 10 m, 사이클당 유량이 40 l일 때를 고려해 보면 우선 바닥체적 V_a 는 최소한 40 l가 되어야 한다. 그리고 V_b 는 V_w 보다 적어야 하므로 그림 3에서 유량 40 l를 나타내는 선상에서 V_b 를 나타내는 선 이하의 영역에서만 조건을 만족하게 된다. 따라서 탱크 W의 최소한의 크기는 78.72 l가 되며, 정확한 값은 주어진 조건 $V_b=40$ l, $P_{ai}=1013$ hPa, $P_{af}=1993.5$ hPa를 대입한 방정식 (8)과 방정식 (9)에서의 등식인 경우를 연립하여 풀면 된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 저온상변화물질을 이용하여 태양열물펌프를 실현할 목적으로 시스템의 각 구성요소의 최적설계를 수행하였으며, 이를 통하여 장치의 각 구성요소간 균형을 도모함으로써 장치 효율을 높이고 자원의 낭비를 방지하고자 하였다. 예비실험결과에서 나타난 사이클 중 물배출과 흡입속도를 분석하여 냉각 열교환능력을 증가시켜야 한다는 것을 확인하고, 작동물질과 공기의 압력과 온도를 예측할 수 있도록 그 관계를 정립하였다. 그리고 양정과 양수량 수준에 따른 각 탱크의 크기를 결정할 수 있는 관계식과 그래프를 정립하고 작성하였으며, 그 설계를 예시하였다.

5. 참고문헌

1. 김영복, 이양근, 이승규, 김성태, 정병섭. 2002. 태양열을 동력원으로 한 물펌프 연구개발-에너지변환실험과 성능해석- 한국농업기계학회 2002 동계학술대회 논문집. pp.167-172
2. Kwant KW, Rao DP and Srivastava AK. Experimental studies of a solar water pump. In: Proc. Int. Solar Energy Congress, Brighton, 1981. P. 1172-6
3. Sumathy, K, A. Venkatesh and V. Sriramulu, Heat transfer analysis of a flat-plate collector in a solar thermal pump, Energy 19 (1994) 983-991
4. Sumathy, K, A. Venkatesh and V. Sriramulu, A Solar thermal water pump, Applied Energy 53 (1966) 235-243

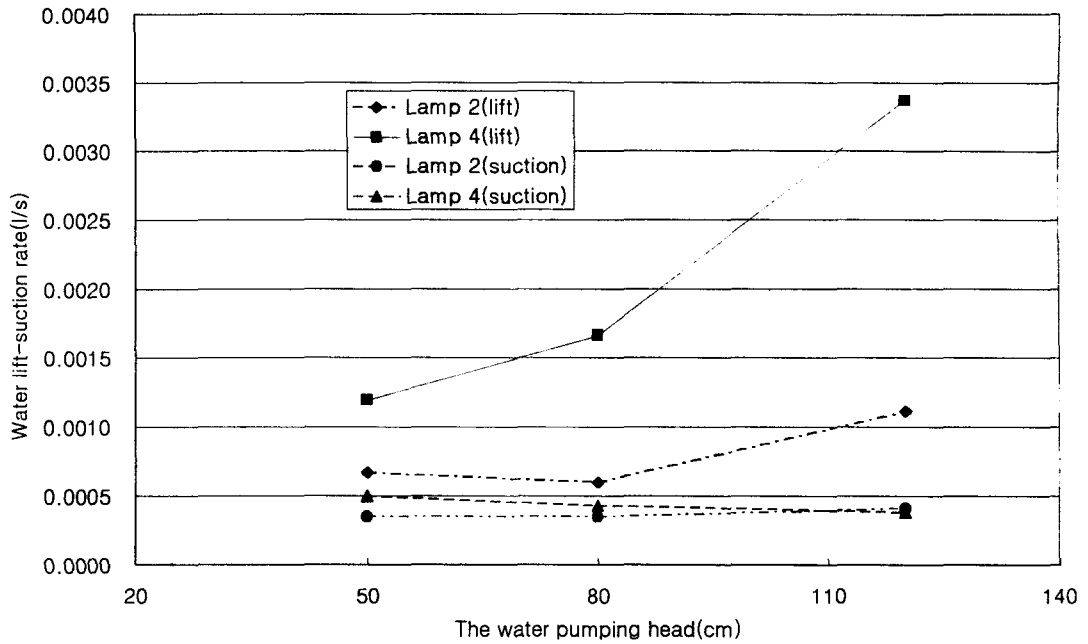


Fig. 2 Water lift and suction rate depending on the water pumping head.

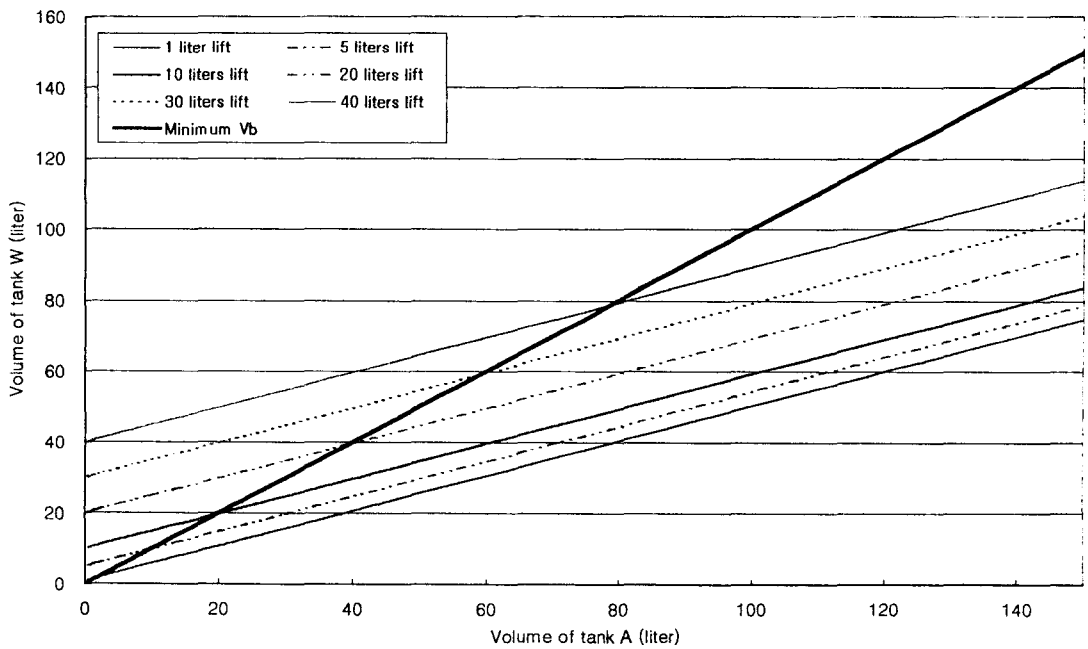


Fig. 3 Volume of tank A, B and W for 10 meters of water head depending on pumping water quantity per cycle