

압력센서를 이용한 태양열물펌프의 자동화운전 † Automatic operation of solar powered water pump by pressure sensing system

김영복* 손재길** 이승규* 김성태* 이양근***
정희원 정희원 정희원 정희원 정희원
Y. B. Kim Son, J. G.* Lee, S. K. Kim, S. T. Lee, Y. K.**

1. 서론

태양열물펌프는 태양에너지를 구동원으로 하여 물을 양수하기 위한 장치로서 엔진을 사용하지 않고도 물을 양수할 수 있을 뿐만 아니라 전기모터를 사용할 수 없는 농촌에서 특히 유리하다. 더구나 물요구가 많은 여름철에 그 동력원인 태양에너지 공급이 풍부하니 이상적인 장치라 할 수 있다. 태양열물펌프의 형태는 태양열을 동력으로 변환하는 방법에 따라 터어빈구동방식, 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. Sumathy(1999)는 1 m²의 평판형 태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 작동물질로서 펜탄을 이용하였으며, 양정의 수준에 따른 펌프구동 사이클을 분석하였고, 전체적인 열효율은 0.12-0.14%를 나타낸다고 하였다. 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/m².day 정도의 일사에너지를 받고 있는 것으로 보고되고 있으며(한국태양에너지학회, 1991), 2000년 우리나라 지역의 평균 연간 총 일조시간은 약 2,112시간(기상청홈페이지, 2002), 하루 평균 일조시간은 5.786 시간으로 나타났다. 이 평균일조시간을 기준으로 평균태양강도를 계산하면 약 0.6 kW/m²이 된다. 본 연구에서는 태양열물펌프의 자동화운전을 위해 자동제어논리를 개발하고, 압력센서에 의해 제어되는 장치의 실험을 실시하고 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 장치

실험장치는 그림 1에 나타낸 바와 같다. 물탱크의 용량을 약 50 리터가 되게 하여 사이클 당 양수량의 기준으로 삼았으며, 다른 탱크들은 이에 맞추어 설계하였다(김, 2004). 작동물질의 가열부는 태양열공급의 불균일성을 극복하기 위하여, 실험시간의 단축과 운전변수의 수준에 따른 장치특성을 명확하게 규명하기 위하여 태양열 집열기에 상당하는 복사가열장치를 제작하여 실험하였다. 각 탱크외부에는 40 mm두께의 토이론 단열을 실시하고 물탱크내부에는 작동물질증기가 물에 의해 냉각 응축되는 것을 막기 위해 코르크로서 내부단열을 실시하였다. 그림에서 응축기하단의 회로는 응축기에서 응축된 작동물질을 야간에 회수하는 회로이다. 응축기는 원통다관형으로서 동체 외경 267.4 mm, 동체길이 1,358 mm, 내부 관직경 20 mm, 본당길이 1.204 m, 사용 총동관수 36개로서 총전열면적 8.34 m², 전열계수 약 1

† 이 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업의 논문입니다.
* 경상대학교 농업생명과학대학 농업시스템공학부, 농업생명과학연구원, NURI
** 덴소풍성(주), ***상주대학교기계공학부

$kW/(K \cdot m^2)$ 이었다. 사이클을 반복하여 연속적으로 자동양수하기 위해서는 그 과정을 자동화하여야 하는데 사이클을 자동으로 반복하게 하려면 각부의 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 압력센서를 설치하여 그 상단의 물높이가 배출과 흡입과정에서 변하는 것을 수두압력으로 변환, 전기신호로 읽어 들여 전자밸브를 제어하는 것이

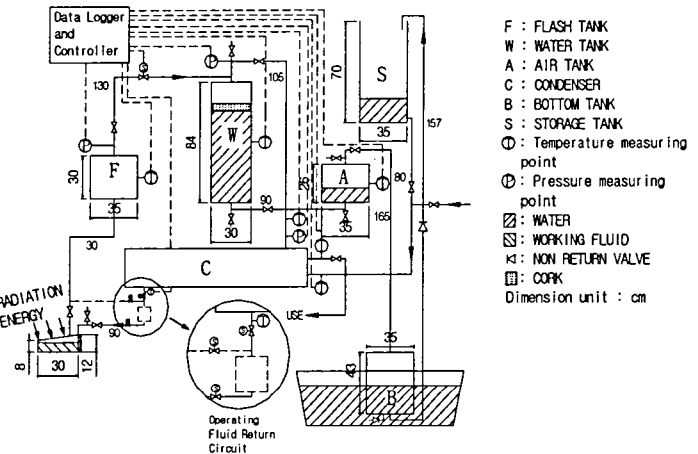


Fig. 1 Experimental system for automatic operation. 이를 위하여 증기물탱크 하단에 $-5000 \sim 5000$ mmH₂O 범위의 압력변환센서를 설치하여 변환된 $0 \sim 5$ V 범위의 전기신호를 전압강하모듈을 이용하여 $0 \sim 2.5$ V로 강하시켜 제어장치에 입력, 전자밸브를 제어하도록 하였다. $-5000 \sim 5000$ mmH₂O 범위의 압력을 $0 \sim 2500$ mV의 범위로 변환, 오프셋을 1250, 배수를 0.25로 하여 계산 출력하였다. 이 출력값(X)을 실제 압력값 P(hPa)로 환산 보정하는 관계식은 그림 2에 나타낸 바와 같이 직선적인 관계로서 $P = 1.1483X - 0.7911$ ($R^2 = 0.9999$)로 나타났다. 측정과 관련한 각부의 사양은 표 2에 나타낸 바와 같다. 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.

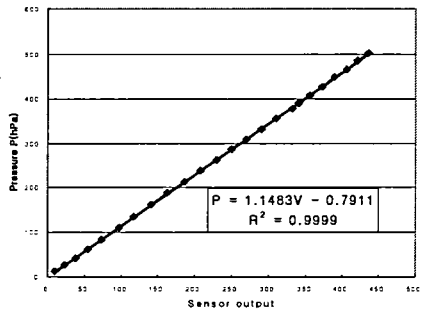


Fig. 2 Calibration of the sensor output and the pressure

나. 자동제어논리

태양열이 공급되면 작동물질이 기화하여 기액분리탱크 내에 증기가 차게 되고 압력이 상승하게 된다. 기액분리탱크와 증기물탱크 사이의 연결밸브를 개방하면 작동물질 증기가 증기물탱크로 밀고 들어가서 양수에 필요한 압력에 도달하면 물을 아래로 밀어붙여 연결된 증기물탱크와 배관을 통하여 물을 양수하게 된다. 하강을 계속하여 증기물탱크내의 수위가 설정된 최하단위치에 도달하면 기액분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 닫고 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 열어 증기물탱크 속의 증기를 냉각시킨다. 냉각이 진행되어 증기물탱크 내 진공이 형성되어 수위가 설정된 최상단위치에 이르면 증기물탱크와 응축기 사이의 밸브를 닫고 기액분리탱크와 증기물탱크 사이의 밸브를 열어 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.

다. 실험방법

실험에서의 열원은 태양에너지공급의 불균일성과 태양열집열기의 영향을 배제하고 물펌프

만의 성능을 확인하기 위하여, 또한 실험시간을 단축하기 위하여 태양에너지 대신 복사가열 장치를 이용하여 균일한 복사열에너지를 공급하여 수행하였다. 열공급부에 500 W 복사가열 장치 두 개를 작동시켜 1 kW의 복사열을 작동물질인 펜탄이 들어있는 콘테이너 상단에 근접 작동시켜 증기를 발생시켰다. 복사열의 강도는 태양상수보다는 적으며 한국의 평균태양강도보다는 큰 값이 된다. 이 과정에서 응축기에는 냉각수가 순환되는데 냉각수는 양수한 물을 이용하였으며, 실험시간을 줄이고 확실한 결과를 확인하기 위하여 얼음을 넣어 물의 온도를 낮추었다. 양수된 물이 중력에 의해 자연순환되는 량을 측정할 때 물저장탱크 수위에 따라 다소 다르기는 하지만 저장탱크 반 정도 수위에서 약 11.5 kg/min 정도의 유량이 었다. 전자밸브를 열고 닫는 시점은 기액분리탱크 내의 압력이 450 hPa(gauge)이면 열고 150 hPa(gauge)이면 닫도록 컴퓨터프로그램으로 만들어 제어장치에 옮겨 넣음으로서 자동 제어 되도록 하였다. 응축기는 진공펌프를 이용하여 250 hPa 정도의 진공으로 만들어 초기 사이클에 문제가 없도록 하였다. 측정항목은 양수량, 각부의 온도, 압력, 유체의 위치, 적산 전력량 등이었으며, 이 값들을 이용하여 필요한 계산을 하여 분석하였다. 물탱크와 공기탱크 내의 물기둥의 위치를 경시별로 측정하였으며, 측정의 시간간격은 물피스톤의 위치에 따라 밸브를 열고 닫을 때마다 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 양수량과 효율

실험에서 각 사이클 마다 양수된 양은 그림 3에 나타낸 바와 같다. 그림에는 자동화운전에 의한 양수량과 수동운전에 의한 양수량(김, 2004)을 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 13사이클을 수행하였으며, 사이클당 소요시간은 약 4.9분이 었다. 총양수량은 69,200 cc, 사이클당 평균 5,320 cc를 양수하였다. 이 과정동안에 공급된 복사에너지에 대한 전력에너지는 1 kWh이었으며, 양정 157 cm인 물의 양수에 대한 위치에너지의 공급에너지에 대한 비율로서 시스템총에너지효율을 구하면 0.030 %가 된다. 한편 수동운전시에는 약 11사이클로서 자동운전시보다 사이클 시간이 약간 길게 나타났으며 이는 수동운전시 임의로 밸브개폐시간을 조절하였기 때문에 직접적인 비교는 힘들 것으로 판단된다. 수동운전시의 시스템총에너지효율을 구하면 약 0.018 %정도로 나타났다. Sumathy(1999)는 평판형태양열 집열기를 이용한 물펌프에서 열효율이 0.12~0.14 %를 나타낸다고 하였다. 본 연구에서의 에너지변환효율이 기존 연구보다 매우 낮게 나타난 것은 몇가지 관점에서 검토해 볼 수가 있다. 우선 시스템총에너지 효율과 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

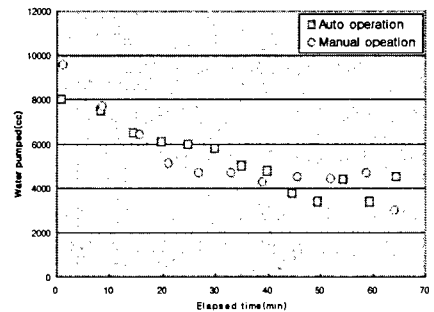


Fig. 3 Water pumped per cycle vs. elapsed time depending on operation method

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.

나. 압력의 변화

실험장치내의 압력변화를 살펴보면 그림 4에 나타낸 바와 같다. 자동운전을 위해 기액분리탱크 내의 압력이 450 hPa(gauge)가 되면 전자밸브를 열어 발생된 증기를 물탱크내로 유입시켜 양수가 되도록 하고 그 압력이 150 hPa(gauge)로 하강하면 전자밸브가 닫히도록 프로그램되었기 때문에 기액분리탱크 내의 압력은 165~450 hPa(절대압력 1178~1463) hPa범위로 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.

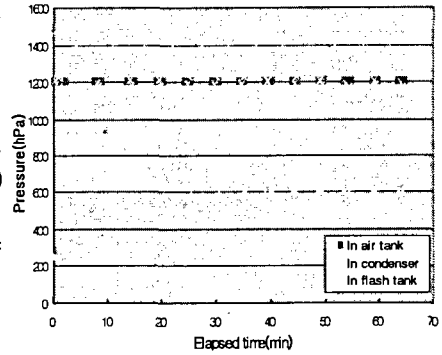


Fig. 4 Pressure history in the elements of the experimental system

4. 요약 및 결론

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 운전되도록 하였으며, 이에 필요한 제어논리를 개발하고 회로를 구성하였다. 실험에서는 장치를 제작, 실험, 분석하였고 분석항목은 양수량과 효율, 압력변화를 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 복사에너지를 동력으로 변환하여 물을 양수할 수 있었고, 자동화제어회로에 의해 사이클을 반복할 수 있었다.
2. 양수는 60분 동안에 13사이클을 수행하였으며, 사이클당 소요시간은 약 4.9분이었다. 총 양수량은 69,200 cc, 사이클당 평균 5,320 cc를 양수하였다. 이 과정동안 장치의 열효율은 0.030 %로 나타났다.
4. 기액분리탱크 내의 압력은 자동화 프로그램된 범위인 150~450 hPa(gauge)를 매우 정확하게 유지하였으며, 공기탱크내의 압력은 약 1200 hPa로 나타났다. 응축기내의 압력은 약 600 hPa로서 진공을 잘 유지하므로써 사이클을 반복하는데 문제가 없었다.

5. 참고문헌

1. Sumathy, K.. 1999. Experimental studies on a solar thermal water pump. Applied thermal engineering Vol. 19, pp. 449-459.
2. 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
3. 기상청 홈페이지. 2000. <http://www.kma.go.kr/index.jsp>
4. 김영복. 2004. 저온상변화물질 특성을 이용한 태양열물펌프 실용화연구개발 연구보고서. 에너지관리공단.
5. 한국태양에너지학회. 1991. 태양에너지핸드북. 태림문화사