

태양열을 이용한 일이중 겸용 흡수식 냉온수기 동적성능 모사연구

신 영 기^{*†}, 서 정 아^{*}, 우 성 민, 김 효 상

^{*}세종대학교 기계공학과, 삼중테크(주)

A Study of Dynamic Simulation of a Hybrid Absorption Chiller Utilizing Solar Power

Younggy Shin^{*†}, Jung-A Seo^{*}, Sung Min Woo, Hyo Sang Kim

^{*}Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 134-747, Korea

SamjungTech Co., Seoul 135-080, Korea

ABSTRACT: A dynamic model has been developed to investigate the operability of a single and double-effect solar energy assisted parallel type absorption chiller. In the study, main components and fluid transport mechanism were modeled. And solar radiation and the solar collector also were also modeled along with its control design. The model was run for the single mode with solar energy supply only and the solar/gas driving double effect mode. From the simulation results, it was found that the present configuration of the chiller is not capable of regulating solution flow rates according to variable solar energy input. And the issues of the excessive circulation flowrate and the mismatch between available solar power and cooling load discourages the use of the single mode, but the dual use of gas and solar power is recommendable in view of controllability and enhanced COP.

Key words: absorption(흡수식), dynamic model(동특성 모델), 태양열 (solar power), heat exchanger(열교환기), absorber(흡수기), 태양 집열기 (solar collector)

1. 서 론

전세계적으로 재생에너지에 대한 관심이 높고 우리나라도 녹색성장을 새로운 산업 동력원으로 한 정책을 실시하고 있다. 태양열은 주로 난방과 온수 공급용으로 보급되어 왔으나 여름철에는 용도가 적어 상대적으로 태양열 이용율이 낮은 형편이다. 태양열의 효율도를 높이기 위하여 흡수식 냉온수기에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만 낮은 성적계수 (COP)와 고가의 시설비용으로 인하여 경쟁력을 갖춘 제품은 아직 출시되지 않았다. 실용화를 위한 제품형태는 태양열과 가스열을 동시에 이용하는 이중효용 하이브리드 흡수식 시스템이다⁽¹⁾. 부분적인 연구방법은 정상상태

에서의 열평형 해석^(1,2)과 태양열을 이용한 단일 효용 시스템 성능측정⁽³⁾이 대부분이다.

문제는 시스템을 제작하여 운전하는 경우 하드웨어적인 구속조건으로 인하여 발생할 수 있는 제어상의 문제점들이 충분히 고찰될 수 없다는 점이다. 많은 비용과 시간이 소요되는 시제품 제작에 앞서 설계된 하이브리드 시스템을 가상 운전하여 문제점을 파악할 수 있는 가상의 시뮬레이터 개념이 유용하다. Fu 등⁽⁴⁾은 Modelica라는 객체지향 언어를 이용하여 동특성 모델을 개발하고 정상상태에서 부하변동을 주어 실험 데이터와 상관성을 확인한 바 있으나 시뮬레이터 개념까지는 확장하지 못하였고 적용대상도 가스만을 이용한 이중효용 흡수식 시스템이었다. 본 연구에서는 직렬식 이중효용 냉온수기 시뮬레이터를 개발한 경험⁽⁵⁾을 활용하여 태양열을 이용한 병렬식 일이중 겸용 하이브리드 흡수식 시스템의 시뮬레

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3284; fax: +82-2-3408-4333

E-mail address: ygshin@sejong.ac.kr

이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 일사량, 태양 집열기 및 제어방식도 포함한다.

2. 동특성 모델링

2.1 시스템 구성

Fig. 1은 태양열 집열기를 제외한 병렬식 하이브리드 LiBr-H₂O 흡수식 냉온수기의 구조를 나타낸다.

기존 병렬식 흡수식에 태양열 온수를 이용하기 위한 solar generator (STG)와 solar condenser (SC)가 추가되고 냉방부하에 따라 일중 이중 겸용 운전이 가능하도록 하기 위한 유량 제어 밸브들이 추가 되었다. Fig. 2는 태양열 집열기와 그 제어 장치의 구성을 나타낸다. 제어 장치는 원가 절감에 의한 실용화를 위해서 ON/OFF 방식의 2개의 솔레노이드 밸브와 선풍기 속도 제어와 동일한 3단 탭 방식을 적용하였다. 제어기는 온수 출구온도를 읽어 설정값 80℃를 유지하도록 PI 제어를 수행하며 PI 출력값의 범위에 따라 정지부터 3단까지의 속도 탭 릴레이를 선택하도록 설

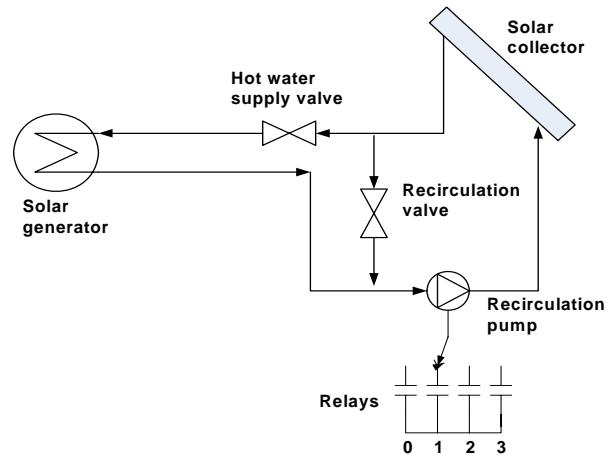


Fig.2 Solar collector and its control

계 되었다. 온수공급밸브와 재순환 밸브는 서로 반대 방향으로 인터록 (interlock)이 되어 있어 집열기 출구온수는 밸브 동작에 따라 Solar generator나 재순환 펌프 중 한 곳으로만 흐르게 되어 있다.

냉온수기 모델은 크게 4개의 영역으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 발생기, 응축기, 흡수기 및

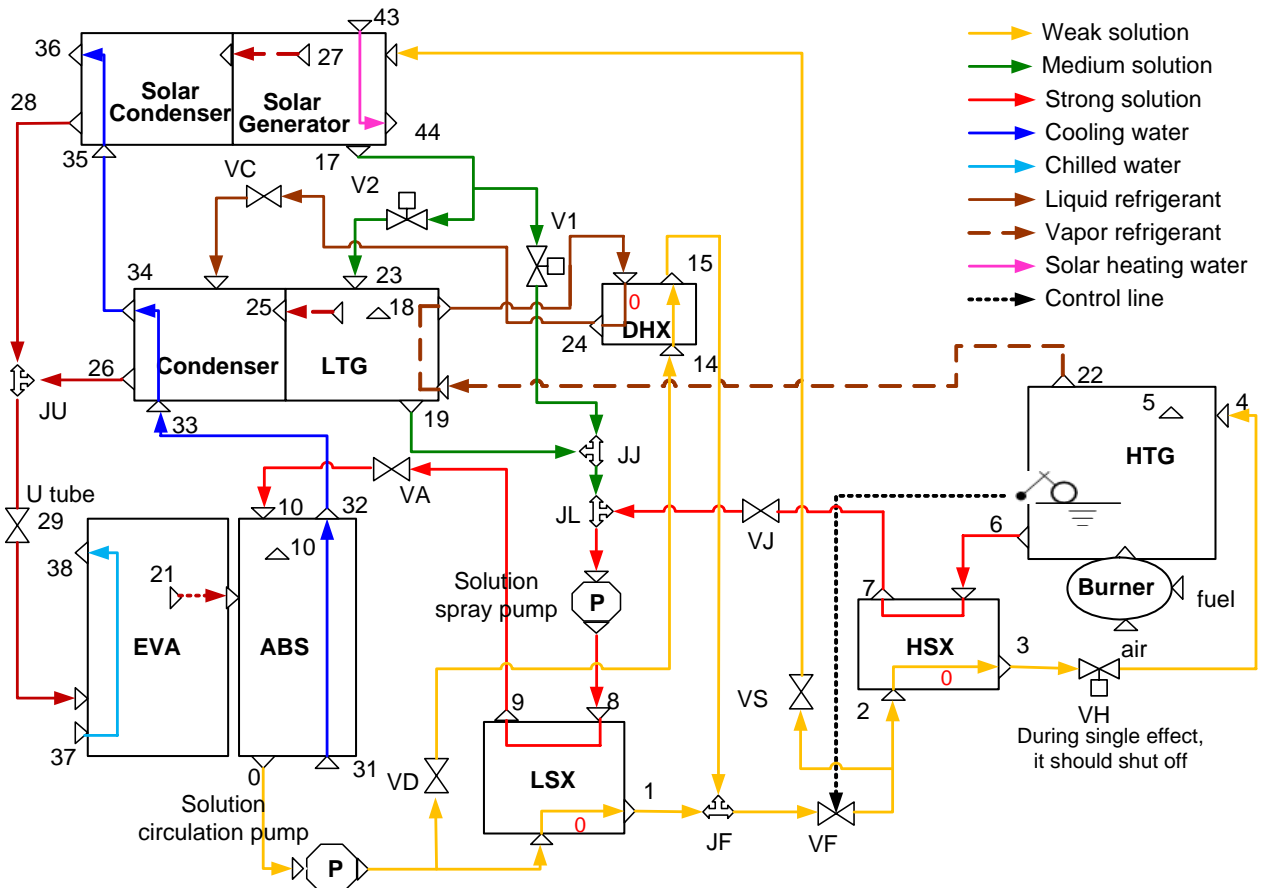


Fig.1 Schematic of a hybrid parallel type absorption chiller

증발기는 쉘-튜브 방식의 열교환기로 모델링 된다. 이 모델은 쉘 측의 작동유체를 상변화를 포함하는 열평형 방정식으로 표현하는 단일 열용량 시스템(lumped system)을 적용하였다. 두 번째는 용액열교환기(Fig. 1의 HSX, LSX, Drain HX)로서 두 개의 대향류 간의 열교환으로 유동방향 온도변화가 존재하는 단상의 현열교환 시스템으로 모델링 된다. 세 번째는 액막형 열교환기인 태양열 발생기(STG)의 모델링이다. 마지막으로 유체이송 메커니즘이 있으며, 병렬식의 경우 그 과정이 복잡하기 때문에 펌프의 유량 특성과 연계하여 모델링하였다.

보일러에서의 열 발생은 일반적인 연소방정식을 적용하여 반응물과 배기 생성물의 엔탈피 차이로부터 발열량을 계산하고 일반적인 보일러 효율만큼의 열량은 고온재생기에 공급되고 나머지 열량은 배기가스 온도 결정에 기여하는 것으로 가정하였다.

2.2 주요 구성요소 모델링

쉘-튜브 방식의 열교환기 및 대향류 현열 열교환기 그리고 액막형 열교환기는 각각 연구자의 관련 연구문헌에서 다룬 바 있으므로⁽⁵⁻⁶⁾ 본 연구에서는 상세한 서술은 생략한다. 모델들은 과도응답특성 모사를 위하여 열용량을 고려한 질량 및 에너지 보존 방정식으로 구성하였다. 해는 물성치 계산루틴과 연계하여 이분법(bisection method)과 같은 수치해석 방법을 적용하여 구하였다. 일사량 및 태양 집열기 열전달 모델은 Duffe et al의 저서⁽⁷⁾에 상세히 서술되어 있으며 이를 토대로 프로그램을 작성하였다.

2.3 시뮬레이션 조건

전형적인 여름 날씨를 모사하기 위하여 7월 31일 오후 12시부터 작동하는 조건으로 모사하였다. 냉방부하는 건물에 설치되는 팬코일 유닛의 작동 뎡수를 조절하는 형식으로 제어하였다. 최초의 1시간은 태양열만으로 구동되는 일중효용 운전이다. 이 경우 가스열원이 없으므로 가스 열을 활용하는 HTG 및 LTG로의 용액순환은 열손실만 증가시킨다. 따라서 Fig. 1의 VH가 단히 HTG로의 용액 공급을 차단하고, 반대방향으로 인터록된 V1과 V2의 V2를 닫아 LTG로의 용액순환을 차단하고 Solution spray pump로 직접

호르게 한다.

태양 집열기 면적은 40 m^2 이고 판형 (plate type)을 적용하였다. 집열기는 정남향이고 지면에 대하여 45° 기울어져 있고 맑은 날씨를 기준으로 일사량을 계산하였고, 대기온도는 30°C 로 설정하였다.

LiBr-H₂O 용액과 냉매인 물의 열역학적 물성치 계산은 각각 Kaita와 NIST의 REFPROP libraries의 결과를 이용하였다. 프로그램 언어는 객체지향 구조인 Microsoft사의 Visual C++를 사용하였고 GUI 구성 및 행렬 연산 등을 위하여 National Instruments사의 Visual Studio를 활용하였다. 지배 방정식 계산을 위한 연산 시간간격은 2초로 설정하였으며 전체 연산시간은 시뮬레이션 운전시간의 약 1/8정도로 짧았으므로, 실제 제어기 인터페이스를 위한 가상 실시간 시뮬레이터 구현이 가능하다.

최초 한 시간의 일중효용 운전 후 나머지 한 시간은 태양열과 가스열을 병용한 이중효용 운전으로 운전모드를 변경하였는데, 첫 번째 경우는 동일한 뎡수의 팬코일 유닛 (20% 부하)에 대하여 운전 모드만 변경하여 시스템이 겪는 교란의 특성을 제어 관점에서 파악하고자 하였고, 두 번째 경우는 팬코일 유닛 작동 뎡수를 5배 (최대 부하) 증가시켜 태양열이 성적계수 향상에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

Fig. 3은 7월 31일 오후 12시부터 2시까지 태양 집열기에 직접 입사되는 일사강도를 계산한 결과를 나타낸다. 2시간 동안 일사강도는 약 10% 감소함을 알 수 있다.

3. 동특성 모델 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 운전모드 변경이 미치는 영향

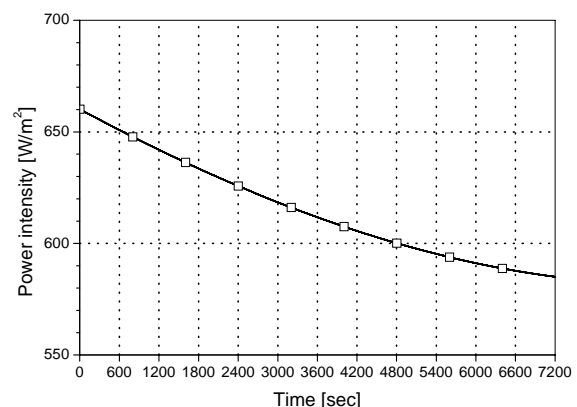


Fig.3 Solar power incident on the collector

Fig. 4는 운전모드에 따른 냉방능력 특성을 보여준다. 결과에 의하면 초기 1시간 동안 약 1.3 RT 수준까지 감소하고 있는데 이는 Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 태양열 공급열원에 비해 용액순환비가 너무 커서 흡수액 농도가 계속 희석되고 있기 때문이다. 용액순환비가 큰 이유는 Fig. 1의 펌프 용량과 밸브 유량계수 등이 이중효용 운전에서 최적화되어 있고 구조와 원가 문제로 일중효용에 맞게 유량조절이 불가능하기 때문이다.

Fig. 7은 냉수 입구 및 출구온도의 거동을 나타낸다. 일중 모드는 과도한 용액순환비로 인해 냉방능력이 감소한 결과 냉수출구온도는 제어설정 온도인 7°C를 유지하지 못하고 계속 상승한다. 반면에 한 시간 후 태양열 겸용 이중모드로 전환한 경우에는 가스열 공급으로 인하여 냉수온도가 급격히 하강하고 운전 종료 10분전에는 설정온도인 7°C로 잘 제어하고 있다. Fig. 8은 가스공급량을 나타낸다. 이중모드로 변환시 13°C에 가까운 냉수출구온도를 7°C로 낮추기 위하여 가스가 최대로 공급되었다가 오차에 반비례하여 가스가 감소하면서 정상상태 냉방부하인 2RT

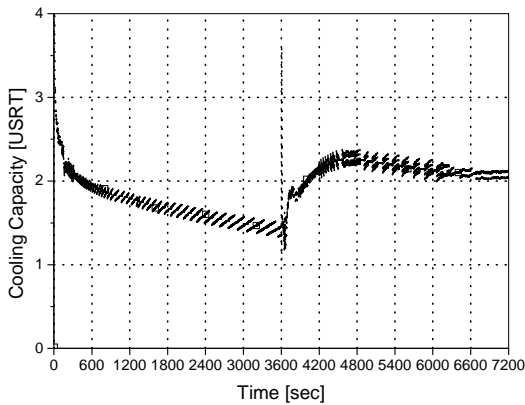


Fig. 4 Cooling capacity between modes

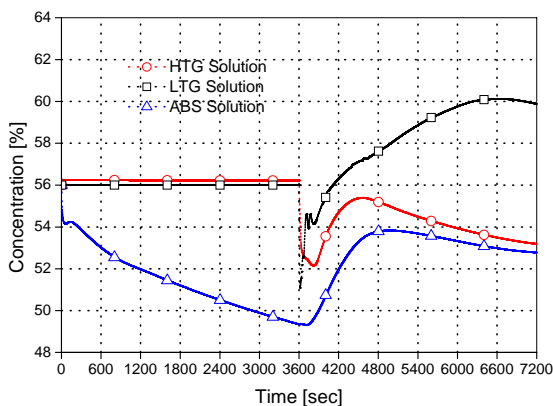


Fig. 5 Solution concentration

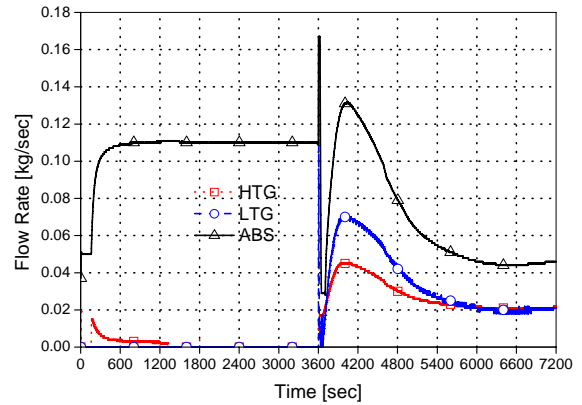


Fig. 6 Solution flow rates

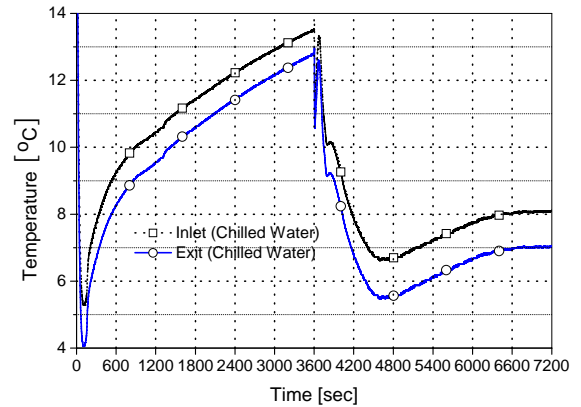


Fig. 7 Chilled water temperatures

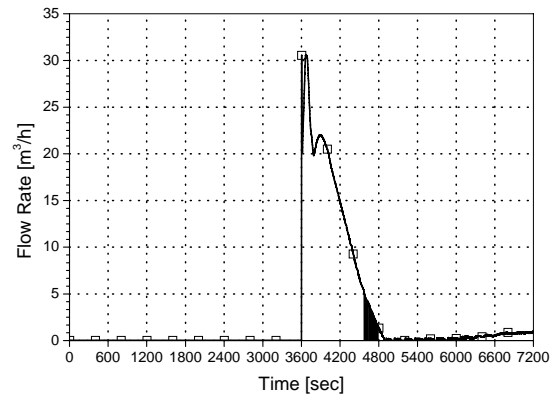


Fig. 8 Supplied gas flow rate

로 수렴 운전되고 있다.

시뮬레이션 결과에 의하면, 모드 변환 운전에 대하여 시스템은 적응성을 보여주고 있지만 태양열 단독운전은 여러 가지측면에서 비효율적이고 가스열원을 병용하여 운전하는 것이 가스 소비량을 줄이고 제어성능을 향상시키는 시너지 효과를 가져 온다고 판단된다.

3.2 부하 변화운전

하이브리드 시스템의 제어 안정성을 평가하기

위해서는 급격한 부하변동에 대한 제어 응답성을 검토해야 한다.

초기 1시간 동안은 앞 절의 경우처럼 건물의 팬코일 유닛 수의 20%만 가동하고 1시간 이후에는 팬코일 유닛을 100% 스텝으로 가동하였다. 운전은 최초 한 시간은 태양열 일중모드, 그 이후는 태양열 겸용 이중모드 운전으로 설정하였다.

Fig. 9는 이 때의 냉방능력과 성적계수 (COP) 추이를 보여준다. 2시간 후의 COP는 약 1.45, 냉방능력은 9 RT 였다. COP는 태양집열기 면적의 크기에 비례하여 공급되는 태양열 운수량이 많을수록 증가하므로 큰 의미는 없다. 시뮬레이션에 적용된 냉수온기는 10 RT를 기준으로 설계된 것인데 아직 태양집열기 면적이 최적화되지 않았다. Fig. 10은 냉수 입출구 온도의 거동을 보여주고 있다. 한 시간후 냉수온도가 급격히 상승하는 것은 냉방부하의 스텝 입력에 비해 시스템이 워업되는데 시간이 걸려 증가하는 냉방부하에 대응하지 못하였기 때문이다. 워업이 종료되면서 냉수 출구온도가 설정온도인 7°C 보다 높은 8°C로 수렴하고 있으며 이는 집열기 면적을 늘리거나 냉수온기 용량 자체를 증대해야 함을 의미한다.

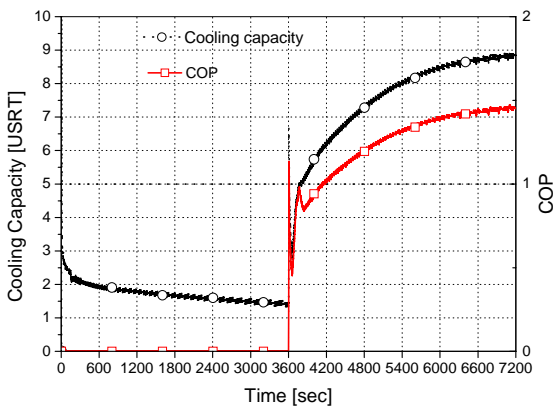


Fig. 9 Cooling capacity and COP

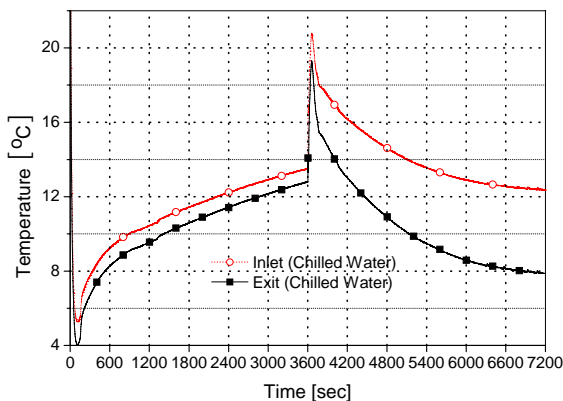


Fig. 10 Chilled water temperatures

의미한다.

Fig. 11은 팬 코일 수 100% 가동에 대응하기 위한 가스공급량 변화를 나타낸다. 최대용량의 가스 공급에도 불구하고 시스템 워업과 팬코일 부하의 점진적인 증가로 인해 시스템이 정상상태를 찾아가는데 한 시간 가량이 소요됨을 냉수출구온도 거동으로부터 알 수 있다. Fig. 12는 용액 농도 거동을 나타낸다. 일중 운전 중 희석되던 희용액 농도는 57.3%까지 증가하고, HTG 농용액은 63.6%까지 증가하여 6.3%의 농도차를 보여주고 있다. Fig. 13은 용액의 온도거동을 나타낸다.

Fig. 14는 태양 집열기에서의 온수 온도와 유량 거동을 나타낸다. 집열기 출구 온수 온도는 80°C이하에서는 집열기에서만 재순환되고 그 이상에서는 오차의 크기에 비례하여 Solar generator로의 순환량이 증가하는 제어구조이다. 현재의 제어기 설계와 펌프 및 집열기 용량에서는 일중 운전의 경우 약 90°C 근처로 유지됨을 알 수 있다. 태양열 겸용 운전모드에서는 출구온도가 상승하고 있는데 이는 가스열로 인하여 Solar generator로 유입되는 용액의 온도가 상승한 결과 집열기로 돌아가는 온수 온도도 87°C 이상으로 증가하고 있고 순환유량도 0.15kg/s가 최

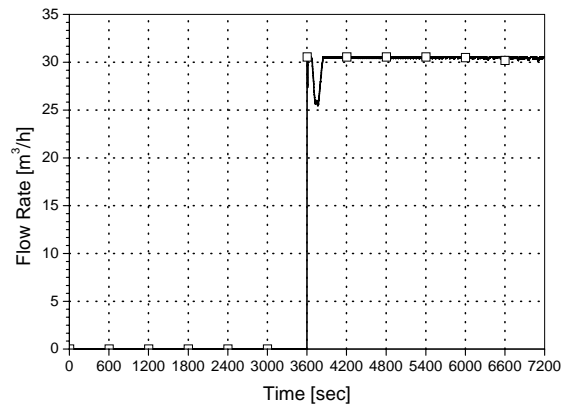


Fig. 11 Supplied gas flow rate

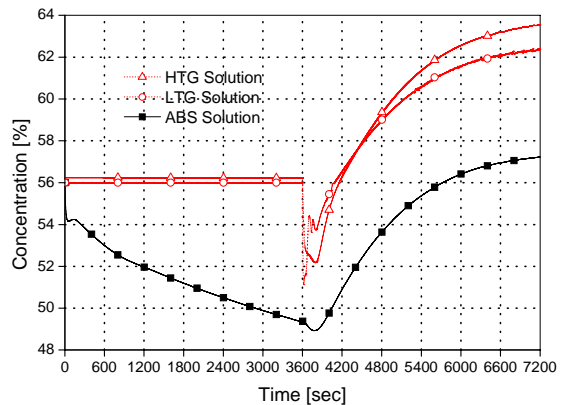


Fig. 12 Solution concentrations

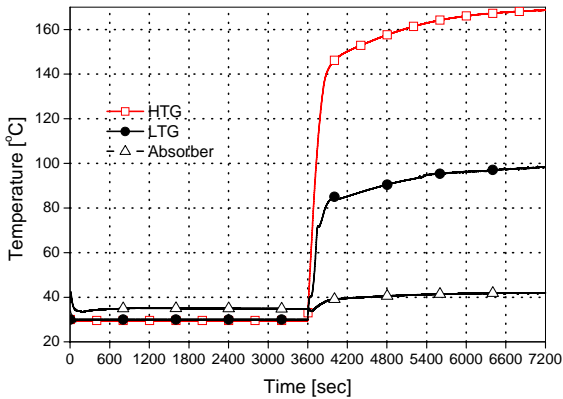


Fig. 13 Solution temperatures

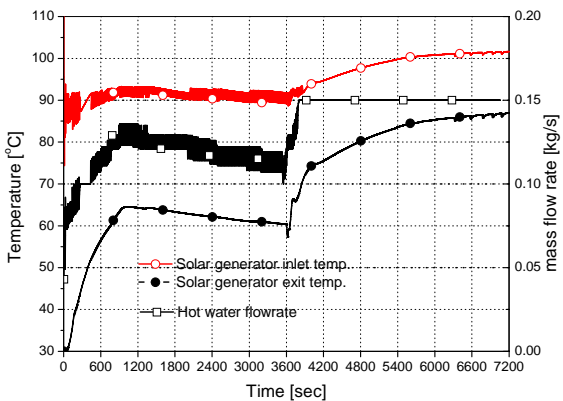


Fig. 14 Water temperatures and mass flow rate through the solar collector

대가 되도록 설계되어 유량이 증가되지 않기 때문이다. 최대 순환 유량을 증대시키는 방안도 검토할 수 있으나 현재 시스템은 펌프 속도가 3단 제어이므로 낮은 태양열 부하에서는 유량 변동이 심해질 수 있다. 유량 제어범위를 넓히기 위해서는 3단 제어가 아니라 인버터를 적용하거나 연속가변되는 바이패스 밸브를 설치하여야 하나 이는 제품의 원가문제를 함께 검토해야 한다.

4. 결론

일일중 겸용 하이브리드 시스템 동특성 모사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

병렬식 이중효용 하이브리드 시스템은 일중 운전시 흡수액 순환유량이 태양열 공급능력에 비해 과도해져 성능이 저하된다. 이는 병렬식 구조 특성상 개선이 어려운 부분이다. 또한 일사조건과 냉방부하를 일치시키기 어려우므로 COP 향상과 제어성능 향상을 위해 태양열 겸용의 이중효용 모드로 상시 운전하는 것이 재생에너지를 활용할 수 있는 실용적인 방법으로 파악된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단인 신재생에너지 에너지자원기술 개발 사업의 일환으로 지원되었다.

참고문헌

1. Y.L. Liu, R.Z. Wang, 2004, Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O absorption system, *Renewable Energy*, Vol. 29, 1677-1695.
2. N. Velázquez and R. Best, 2002, Methodology for the energy analysis of an air cooled GAX absorption heat pump operated by natural gas and solar energy, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, 1089-1103.
3. J. Yu, Y. Wang and C.F. Ma, 2008, Experimental research on a novel generator for solar absorption chiller, *International Sorption Heat Pump Conference*, Seoul KOREA.
4. D.G. Fu, G. Poncia, Z. Lu, Implementation of an object-oriented dynamic modeling library for absorption refrigeration systems, *App. Therm. Eng.* 26 (2006) 217 - 225.
5. Y. Shin, J.A. Seo, H.W. Cho, S.C. Nam and J.H. Jeong, 2009, Development of a Dynamic Model for Double-Effect LiBr-H₂O Absorption Chillers and Comparison with Experimental Data, *SAREK Journal*, vol. 20, No. 12.
6. Y. Shin, J.A. Seo, S.M. Woo, S.H. Kim, 2008, A Study on Dynamic Simulation of a Hybrid Parallel Absorption Chiller, *SAREK winter conference*, pp. 630-635.
7. J.A. Duffe and W.A. Beckman, 2006, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley.