

리튬브로마이드를 작동유체로 사용하는 3RT급 하이브리드 흡수식
냉동기의 프로토타입 개발 및 실증실험

이재달, 이장호*, 김무환
포항공과대학교, *군산대학교

Development and feasibility test of 3RT hybrid absorption chiller
using LiBr solution as working fluid

Lee Jae Dal, Lee Jang Ho*, Kim Moo Hwan

Department of Mechanical Engineering, POSTECH, Po-hang, Korea,

*School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

1. 서론

흡수식 냉동기는 환경친화적인 물질인 암모니아/물, 물/리튬브로마이드를 작동유체로 사용하며 증기 압축식 냉동기의 압축기를 대신하여 흡수기와 발생기를 사용함으로써 냉매의 냉동능력을 회복시킨다. 구동에너지 측면에서 증기 압축식 냉동기는 압축기에 전기를 사용하며 흡수식은 열원을 사용한다. 흡수식 냉동기는 전기를 동력으로 사용하는 증기 압축식 냉동기에 비해서 천연가스, 배열을 열원으로 사용하므로 계절에 따른 에너지의 효율적인 사용과 원활한 수급에서 유리하다. 또한 에너지 절감과 가용에너지 사용을 높이기 위해서 냉동기의 효율 및 사이클의 복합화는 필요하다. 증기 압축식 냉동기[1]의 압축기에 전기를 사용하는 대신에 Rankine 사이클의 터빈 동력을 사용하고 Rankine 사이클의 구성과 작동유체의 선택에 따라서 냉동사이클과 동력 사이클을 집적할 수 있다[2]. 그리고 증기 압축식 냉동사이클과 흡수식 냉동사이클을 적절히 조합함으로써 냉동사이클의 하이브리드화를 만들 수 있다[3,4].

본 논문에서는 고온열원에서 작동하는 이중효용 사이클과 중저온 열원에서 작동하는 일중효용 사이클을 집적하여 하이브리드화를 하였다. 작동유체는 리튬브로마이드 수용액을 사용하였고 실증실험을 위한 냉동능력은 3RT이다. 본 연구에서 개발한 하이브리드 흡수식 냉동기는 냉매발생 측면에서 고온열원용 발생기와 중온수용 발생기로 구성되고 흡수기, 증발기, 응축기는 공동으로 사용된다.

본 연구를 통하여 이중효용과 일중효용의 하이브리드 사이클의 개발 및 작동모드에 대한 사이클 내부의 열역학적 상태량을 파악할 것이다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig.1은 본 연구에서 개발한 하이브리드 흡수식 냉동기 사이클의 구성도를 보여준다. 고온열원인 스팀을 사용하는 이중효용 사이클과 중온수를 열원으로 하는 일중효용 사이클을 집적하는 하이브리드 흡수식 냉동기이다. 리튬브로마이드(lithium bromide) 수용액에서 냉매를 발생시키기 위하여 열원을 공급받는 발생기는 고온발생기(high generator), 중온수용 발생기(generator)이다. 고온발생기에서 발생하는 냉매의 응축열을 사용하여 고온발생기의 중용액(intermediate solution)에서 냉매를 생성시키기 위한 저온발생기(low generator)가 있다. 그리고 응축기(condenser), 증발기(evaporator), 흡수기(absorber)는 공동으로 공유하게

된다. 흡수기 출구에서 이중효용 사이클과 일중효용 사이클로의 리튬브로마이드 수용액의 분배를 위하여 각각의 사이클에 해당되는 독립적인 용액펌프(solution pump)를 설치하였다. 리튬브로마이드 수용액의 분배형태는 이중효용 사이클의 작동에서는 흡수기에서 나오는 묽은용액(weak solution)은 고온발생기로 이동하고 냉매를 일차 농축 후 저온발생기에서 이차 농축이 일어나는 직렬흐름(series flow)이다. 그리고 용액의 열교환을 위해서 흡수기와 고온발생기, 중온수용 발생기, 저온발생기 사이에서 용액열교환기(solution heat exchange)가 설치되었다. 고온발생기와 중온수용 발생기에서 냉매를 생성시키기 위해서 고온스팀과 중온수가 각각 공급되고 냉각수(cooling water)는 흡수기에서 응축기로 흐르면서 용액의 흡수열과 냉매의 응축열을 빼앗는다. 그리고 냉수(chilled water)는 증발기로 유입되고 응축기에서 공급되는 냉매에 의해서 증발잠열을 빼앗기고 냉각된다. 그리고 사이클 외부의 열교환을 위하여 스팀공급 장치, 냉수공급 장치, 냉각수공급 장치가 하이브리드 흡수식 냉동기와 구성된다.

Fig.1에 표시된 숫자들은 흡수식 냉동기 사이클 및 외부열원의 열역학적 상태량을 측정하기 위한 지점들이다.

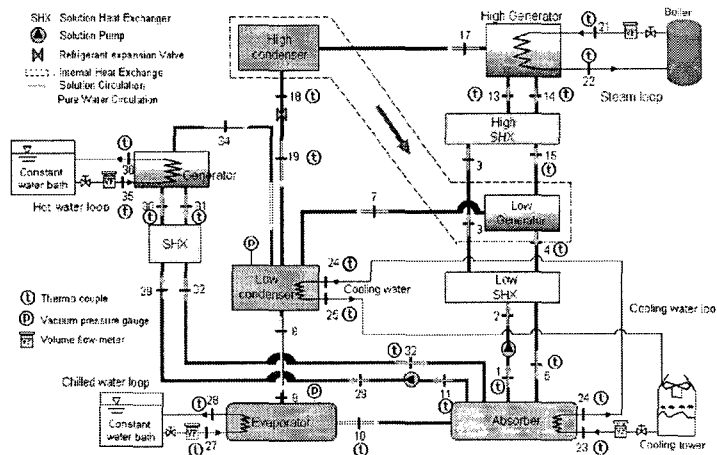


Fig. 1. Schematic diagram of hybrid absorption chiller; Design consists of LiBr-H₂O double and single effects absorption chiller and numbering points represent thermodynamic state points to measure temperatures and pressures.

2-2. 실험방법 및 조건

하이브리드 흡수식 냉동기 사이클 내부의 상태를 파악하기 위하여 Fig. 1에서 열역학적 지점이 표시되듯이 각 열교환기의 입구, 출구의 온도를 측정하기 위하여 열전대(T-type)를 설치하였다. 또한 진공압력계(accuracy: 1%)를 설치하여 증발기, 응축기의 작동압력을 측정하였다. 보일러에서 고온발생기로 고온스팀을 공급하는 스팀루프에는 온도측정을 위하여 백금저항온도계(RTD)와 스팀의 부피유량을 측정하기 위한 부피유량계(accuracy: 1%)가 설치된다. 냉수와 냉각수 루프에는 온도측정을 위해서 백금저항온도계 (RTD)와 부피유량계(accuracy: 1%)가 설치된다. 항온조에 의해서 냉수는 증발기로 유입되고 냉각수는 냉각탑(cooling tower, 5CRT)에서 공급된다.

하이브리드 사이클의 외부 유체의 의한 고온발생기, 중온수용 발생기, 응축기, 증발기, 흡수기로 열전달은 아래의 식으로 표현된다.

$$Q_a \cong \dot{m}_{23} c_p (T_{24} - T_{23}) \quad \text{for cooling water to absorber} \quad (1)$$

$$Q_{hg} = \dot{m}_{21} (h_{21} - h_{22}) \quad \text{for high temperature steam to high generator} \quad (2)$$

$$Q_c \cong \dot{m}_{24} c_p (T_{25} - T_{24}) \quad \text{for cooling water to condenser} \quad (3)$$

$$Q_e \cong \dot{m}_{27} c_p (T_{27} - T_{28}) \quad \text{for chilled water to evaporator} \quad (4)$$

$$Q_g \cong \dot{m}_{35} c_p (T_{35} - T_{36}) \quad \text{for hot water to generator} \quad (5)$$

사이클 내부에서의 물질평형(mass balance)은 아래의 식으로 표현된다. 여기서 ζ 는 열역학 지점에서의 리튬브로마이드 수용액의 농도이다.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_5 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{32}, \quad \dot{m}_1 \zeta_1 + \dot{m}_{11} \zeta_{11} = \dot{m}_5 \zeta_5 + \dot{m}_{32} \zeta_{32} \quad \text{for absorber} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{17}, \quad \dot{m}_{13} \zeta_{13} = \dot{m}_{14} \zeta_{14} \quad \text{for high generator} \quad (7)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{32} \quad \text{for condenser} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9 \quad \text{for evaporator} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} + \dot{m}_{31}, \quad \dot{m}_{30} \zeta_{30} = \dot{m}_{31} \zeta_{31} \quad \text{for generator} \quad (10)$$

사이클 내부에서의 에너지평형(energy balance)은 아래의 식으로 표현된다.

$$Q_a = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{32} h_{32} - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} \quad \text{for absorber} \quad (11)$$

$$Q_{hg} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{13} h_{13} \quad \text{for high generator} \quad (12)$$

$$Q_c = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{19} h_{19} + \dot{m}_{34} h_{34} - \dot{m}_8 h_8 \quad \text{for condenser} \quad (13)$$

$$Q_e = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_9 h_9 \quad \text{for evaporator} \quad (14)$$

$$Q_g = \dot{m}_{31} h_{31} + \dot{m}_{34} h_{34} - \dot{m}_{30} h_{30} \quad \text{for generator} \quad (15)$$

하이브리드 흡수식 냉동기의 성능계수(COP)와 순환비(circulation ratio)는 아래의 식으로 표현된다.

$$COP = \frac{Q_e}{Q_{hg} + Q_g} \quad (16)$$

$$f_d = \frac{\dot{m}_{13}}{\dot{m}_{17}} = \frac{\zeta_{14}}{\zeta_{14} - \zeta_{13}} \quad \text{for double effect absorption chiller} \quad (17)$$

$$f_s = \frac{\dot{m}_{34}}{\dot{m}_{30}} = \frac{\zeta_{31}}{\zeta_{31} - \zeta_{30}} \quad \text{for single effect absorption chiller} \quad (17)$$

사이클 내의 물질 및 에너지 평형을 예측하기 위하여 고온발생기 출구, 저온 발생기 출구, 중온수용 발생기 출구, 흡수기 출구, 응축기 입출구, 증발기 입구의 열역학적 상태(thermodynamic state)를 포화상태라고 가정하였다. 그리고 리튬브로마이드 수용액과 외부 열원의 물성치는 EES로부터 계산하였다[6].

하이브리드 흡수식 냉동기의 개발 및 실증을 위한 실험으로 작동모드(operation mode)는 크게 두 가지로 나뉘어진다. 첫 번째 실험은 고온발생기에 고온스팀을 공급하여 이중효용 사

이클 작동을 3RT로 구동하였다. 두 번째 실험은 이중효용 사이클 작동을 2RT로 정상상태로 운전하면서 증온수용 발생기에 증온수를 공급하여 일중효용을 작동시키면서 전체 냉동능력을 3RT로 작동시켰다. 그리고 두 가지 작동모드에 대한 흡수식 냉동기의 구동 초기압력은 15torr로 유지하였다.

3. 실험결과

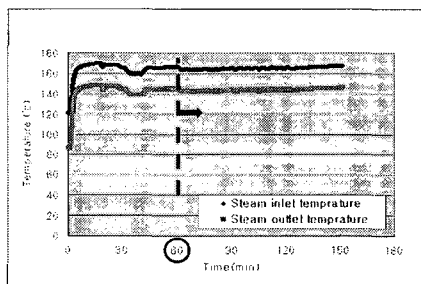
하이브리드 흡수식 냉동기의 각 작동모드에 대하여 증발기로 유입되는 냉수 입구온도와 유량은 25°C와 3000kg/h, 냉각수 유량은 3000kg/h, 증온수 유량은 1000kg/h로 세팅하였다. 냉수출구 온도에 따라서 요구되는 냉동능력(cooling capacity)을 맞추기 위해서 열원인 고온 스팀과 증온수의 공급을 조절하였다.

3-1. 이중효용 3RT 구동

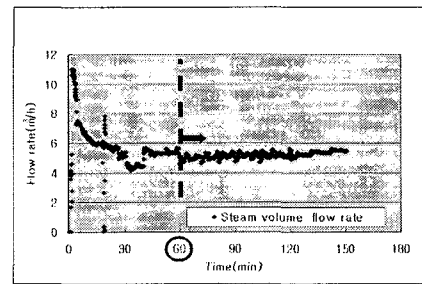
Fig. 2와 Fig. 3은 냉동능력 3RT를 도달하기 위하여 고온발생기에 스팀을 공급함으로써 하이브리드 흡수식 냉동기의 이중효용 사이클만 작동했을 때 시간에 따른 스팀, 냉각수, 냉수의 입출구 온도, 유량을 보여준다. 냉동기 구동 후 약 60분 후에 냉수의 입출구 온도차가 3°C가 낮으며 3RT의 냉동능력에 도달 되었다. Table. 1은 60분 후 각 열교환기의 열교환량을 계산한 값들이다. 그리고 COP는 1.2, 순환비는 9.5로 예측된다. Fig. 6(a)은 60분 후 이중효용 사이클에서 형성되는 3개의 압력, 3개의 농도레벨을 보여준다.

Table. 1 Heat exchange of each component for 3RT double effect operation.

Component	Heat exchange(kW)	
	High generator	Q_{hg}
Absorber	Q_a	11.3
Condenser	Q_c	10.1
Evaporator	Q_e	10.4



(a)



(b)

Fig. 2. Temporal evolution of steam temperature and flow rate as heat source for 3RT double effect operation. (a)steam temperature, (b)steam flow rate

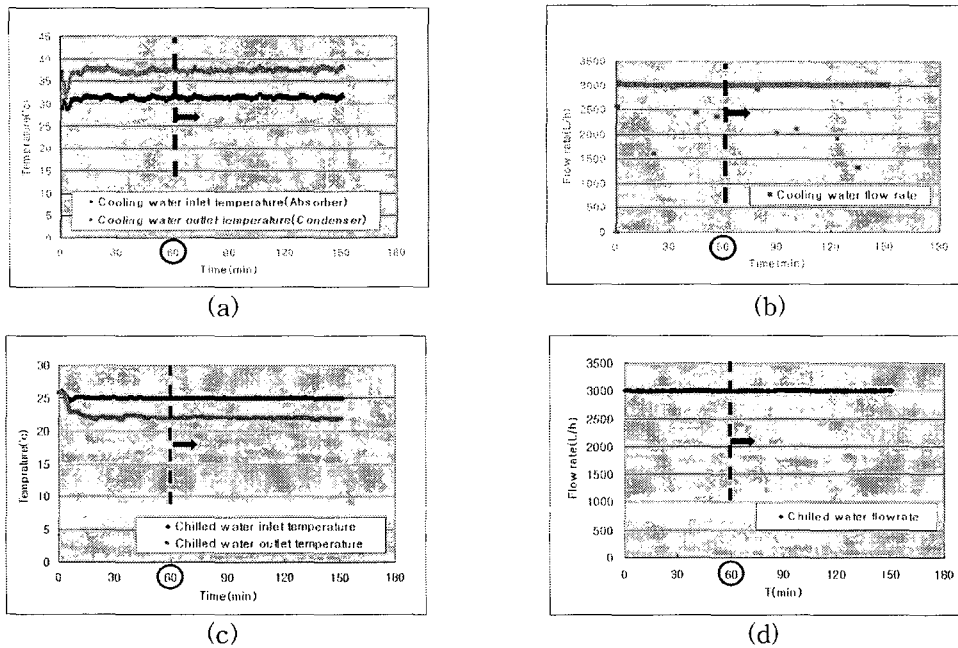


Fig. 3. Temporal evolution of temperatures and flow rates of cooling and chilled water for 3RT double effect operation. (a), (b): cooling water, (c), (d): chilled water

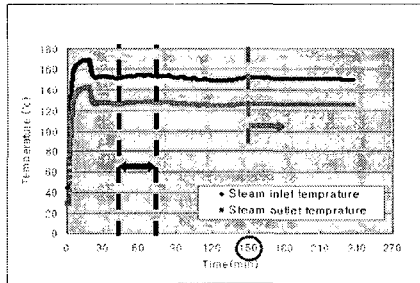
2. 하이브리드 3RT 구동

Fig. 4와 Fig. 5는 이중효용과 일중효용의 동시구동으로 냉동능력 3RT를 작동 했을 때 시간에 따른 열원(스팀, 중온수), 냉각수, 냉수의 입출구 온도와 유량을 보여준다. 냉동기 작동 초기에는 고온스팀만 공급하여 이중효용 사이클을 2RT로 작동하였다. 냉동기 작동 후 45분 후 이중효용 2RT가 도달 되었다. 그리고 80분 까지 이중효용을 작동시키면서 중온수를 공급하여 냉동능력을 3RT로 맞추어 나갔다. Table. 2는 하이브리드 3RT 구동 시 각 열교환기에서의 열교환량을 보여준다.

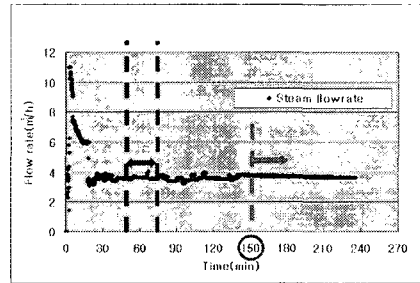
Table. 2 Heat exchange of each component for 3RT hybrid operation.

Component	Heat exchange(kW)	
High generator	Q_{hg}	5.2
Generator	Q_g	4.2
Absorber	Q_a	11.5
Condenser	Q_c	9.1
Evaporator	Q_e	10.4

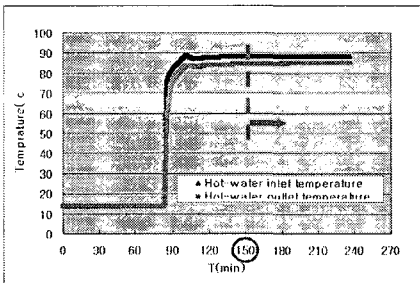
하이브리드 구동에서는 전체 냉동능력에 대한 이중효용의 냉동능력 비는 0.65로 계산된다. COP는 이중효용과 일중효용의 각각에 대해서 1.2와 0.8 정도가 계산 되었으며, 식 (16)에 의해서 하이브리드 냉동기의 COP는 1.0 정도이다. 그리고 일중효용과 이중효용 사이클 구동 순환비는 각각 8.3과 10.5이다. Fig. 6(b)은 이중효용 단독구동 2RT와 하이브리드 구동 3RT의 각각에 대한 3개의 압력레벨과 3개의 온도레벨을 보여준다.



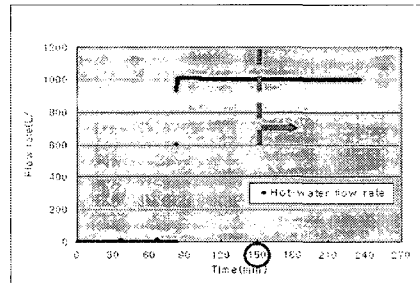
(a)



(b)

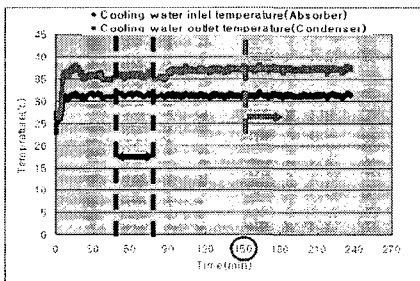


(c)

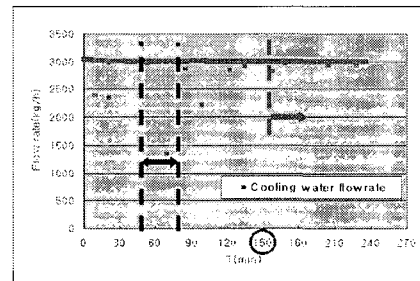


(d)

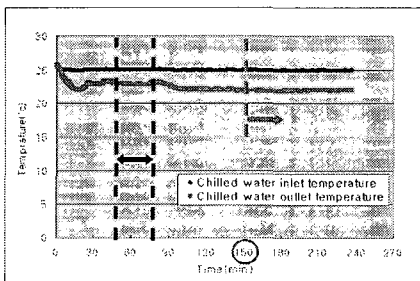
Fig. 4. Temporal evolution of temperatures and flow rates of steam and hot water as heat sources for 3RT hybrid operation. (a), (b): steam, (c), (d): hot water



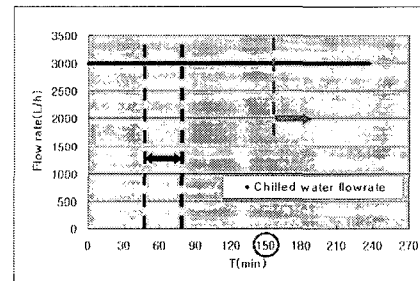
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Temporal evolution of temperatures and flow rates of cooling and chilled water for 3RT hybrid operation. (a), (b): cooling water, (c), (d): chilled water

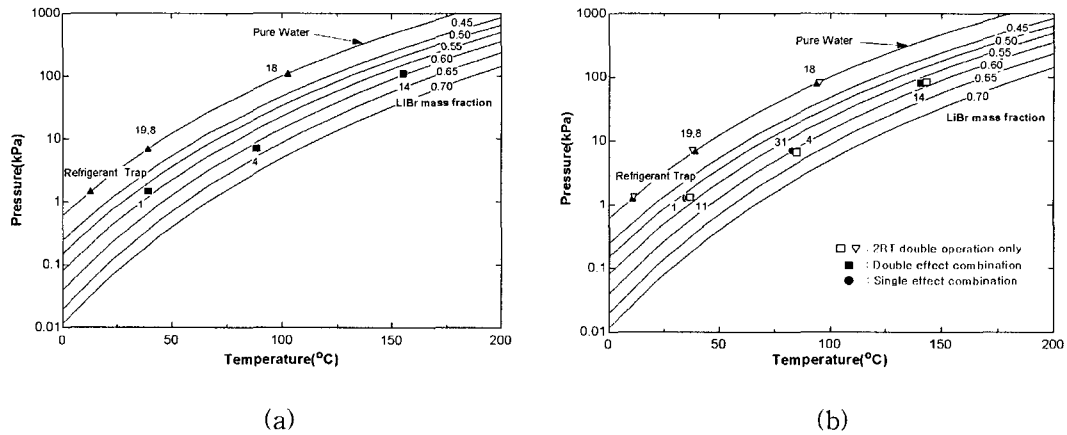


Fig. 6. Dühring plot of concentration levels of aqueous lithium bromide solution and pressure levels at saturated assumption. (a)double effect operation, (b)hybrid operation

4. 결론

본 논문에서 개발한 하이브리드 흡수식 냉동기는 온도가 서로 다른 레벨의 열원을 동시에 사용가능한 새로운 개념의 흡수식 냉동기이다. 또한 흡수기, 응축기, 증발기를 공통으로 공유함으로써 이중효용과 일중효용의 집적화를 콤팩트하게 하였다. 실증실험을 위하여 냉동능력 3RT를 도달하기 위한 이중효용 단독구동과 이중효용과 일중효용을 동시구동을 시행하면서 하이브리드 냉동기의 성능, 순환비, 열교환량, 열역학적 상태량 등을 파악하였다. 결론적으로 온도레벨이 다른 열원을 독립적, 동시적으로 사용함으로써 냉매발생량을 증가시킬 수 있으며 하이브리드 흡수식 냉동기의 적용 및 응용적인 측면에서 배열과 태양열 사용 등 신재생에너지 열원의 효율적 사용이 기대된다.

5. 참고문헌

1. Bejan, A. Advanced of engineering thermodynamics , Wiley Interscience, 1997
2. Jeong, J.H.; Kang, Y. T. Analysis of a refrigeration cycle driven by refrigerant steam turbine, International Journal of Refrigeration, 2004, 27, 33-41
3. Herold, K.E.; Howe, L.A; Radermacher, R. Analysis of a hybrid compression-absorption cycle using lithium bromide and water as the working fluid, International Journal of Refrigeration, 1991, 14, 264-272
4. Howe, L.A.; Radermacher, R.; Herold, K.E. Combined cycles for engine-driven heat pump, International Journal of Refrigeration, 1989, 12, 21-28
5. Herold, K.E.; Radermacher, R.; Klein, S.A. Absorption Chillers and Heat Pumps , CRC press, 1996
6. EES(Engineering Equation Solver), Educational Version 6.01, F-Chart
7. McNelly, L.A Thermodynamic Properties of Aqueous Solutions of Lithium Bromide, ASHRAE Trans., 1979, 85(1), 413-434
8. Kyung, I.S.; Herold K.E. Performance of Horizontal Smooth Tube Absorber With and Without 2-Ethyl-Hexanol, Journal of Heat Transfer, 2002, 124, 177-183