

작동매체에 따른 2중효용 흡수식 시스템의 성능해석

Thermodynamic Analysis of Double-effect Absorption Heat Pump System with New Working Pairs

원 승 호,* 이 영 수*
S. H. Won, Y. S. Lee

Key Words : Heating and cooling (냉난방), Double effect absorption (2중효용 흡수식),
Working fluids (작동매체)

ABSTRACT

Performance analysis of double-effect absorption heat pump system has been done to find improved working pairs (or mixture) by computer simulation. Based on the thermodynamic analysis, the coefficient of performance and mass flow ratio are investigated to compare three aqueous solutions [LiCl-water, LiSCN-LiBr-water, LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂-water] which was developed for only cooling, with conventional LiBr-water solution.

It is found that the performances of the new aqueous solutions are better than that of LiBr-water solution not only in cooling systems, but also in heating systems. Theoretical thermodynamic performance data can be used in heat recovery systems by basic design data.

기 호 설 명

COP : 성능계수
F_R : 질량유량비
H : 엔탈피 (kJ/kg)
HE : 용액 열교환기
P : 압력 (Pa)
Q : 열량 (kW)
X : 수용액 농도 (%)
T : 온도 (°C)
< 하첨자 >
A : 흡수기

C : 응축기
E : 증발기
G : 발생기
GC : 제 2 발생기
re : 냉매

1. 서론

도시지역에서 전기식 히트펌프를 대체하여 냉난방을 수행할 수 있는 유일한 시스템은 흡수식 히트펌프이다. 흡수식은 천연가스나 기타 열원인 열에너지를 사용할 수 있으므로

일반적인 지역 냉난방에의 적용에 유리하다. 특히 생활수준의 향상에 따른 냉방 수요의 급격한 증대에 따라 전력의 제한 사용이 불가피할 정도인 국내 실정에서는 매우 유망한 시스템이라고 할 수 있다. 또한 전기식(압축식) 히트펌프의 작동매체인 프레온에 의한 환경공해도 흡수식 시스템에서는 거의 없으며, 기계적 구동부분이 거의 필요하지 않은 시스템으로 최근에도 활발한 연구가 수행되고 있다.

흡수식 히트펌프에 대한 열역학적 연구는 1940년대부터 수행되었으며 현재는 LiBr 수용액, 암모니아 수용액이 실용화되어 사용되고 있으며, 이 시스템에 대한 연구도 계속되고 있다. 전기식 히트펌프에 비하여 성능이 낮은 단점을 보완하기 위하여 여러가지 사이클이 시도되고 있으나 현재는 2중효용 사이클에 대하여 많은 연구^{1,2)}가 수행되고 있다. 이들 수용액의 고유 물성치에 따라 효율이 결정되는 흡수식 히트펌프는 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있는 수용액 개발이 필요하다. 이에 대한 연구로서 윈 등은 LiCl 수용액을 사용하여 2중효용 시스템에 관한 냉방성능 해석^{3,4)}, LiBr-LiSCN 수용액에 대한 2중효용 시스템의 냉난방성능 해석^{5,6)}이 수행되었으며, Kaushik⁷⁾은 복합염 [LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂] 수용액에 대하여 1.2중효용 냉방해석을 수행하였으며, 윈 등⁸⁾은 복합염수용액, LiCl 수용액, LiBr 수용액에 대한 1.2중 시스템의 성능비교 연구를 수행하였다. 이외에도 많은 연구자에 의한 여러 작동매체에 대하여 연구가 시도되었으나 2중효용 시스템에서의 여러가지 작동매체에 대한 종합적인 성능비교 연구는 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 냉매로는 물을 사용하고 흡수제는 LiBr, LiCl, LiBr-LiSCN, LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ [MCS]의 4가지 혼합물에 대한 2중효용 시스템의 냉방, 난방성능비교 연구를 수행하였으며 작동온도 변화에 따른 성능해석을 수행하는 경우 시스템의 크기를 결정하기 위하여 질량유량비¹¹⁾도 동시에 비교하였다.

2. 작동원리 및 전산 모델링

그림 1에 나타난 바와 같이 이중효용 흡수 사이클은 5개의 온도영역과 3개의 압력영역으로 이루어져 있다. 5가지 온도영역은 제 1 발생기의 평형온도, 제 2 발생기의 평형온도, 응축기내의 평형온도, 증발기내부의 평형온도 및 흡수기의 내부 평형온도이지만 제 2 발생기의 평형온도는 시스템 평형조건으로부터 계산되므로 결국은 4가지 온도의 지배를 받게 되며, 3가지 압력영역은 (1) 증발기의 온도로부터 결정되는 증발기와 흡수기의 내부 압력으로 저압영역 (2) 응축기 온도로부터 결정되는 응축기와 제 2 발생기의 내부 압력으로 중압영역 (3) 제 2 발생기 내부온도로부터 결정되는 제 1 발생기의 고압영역이다. 시스템 작동 평형상태로부터 회용액은 흡수기에서 송출되어 상대적으로 높은 온도인 제 1 발생기로 이송되고 수용액에서 증기(수증기)를 발생한다. 열원(S. C.)으로부터 열을 공급받아 제 1 발생기에서 발생한 증기는 상대적으로 고압 영역인 제 2 발생기에서 응축되며 이때 발생한 응축열은 제 1 발생기에서 용액열교환기를 통과하면서 온도와 압력이 강화된 농용액으로부터 증기를 재발생하는데 사용된다. 제 2 발생기에서 발생한 냉매 증기는 응축기로 이송되어 냉각 공기나 냉각수에 의해서 응축된다. 응축된 총 냉매량은 제 1 발생기에서 발생하여 제 2 발생기에서 응축된 냉매의 합이며 이때 방출된 응축열을 이용하여 난방을 하게 되며 응

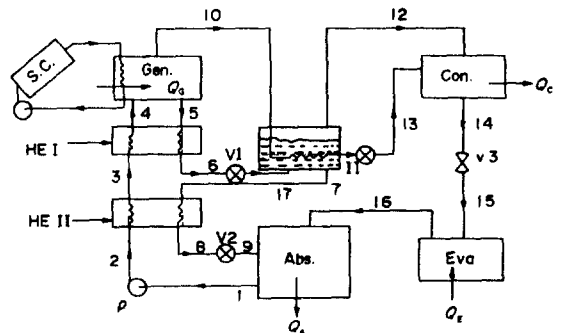


Fig.1 Block diagram for a double-effect absorption heat pump

축기에서 증발기로 이송되면서 감압된 냉매의 연속된 증발열에 의하여 냉방을 하게 된다. 그리고 증발된 냉매는 흡수기에서 농용액에 흡수된다. 2중효용 시스템의 사이클 해석에 관한 원리는 원 등^{8,9)}의 연구보고서에 자세히 설명되어 있다.

전산 해석을 위하여, 각 시스템의 온도, 열교환기의 유효율, 냉매 순환량 등은 모두 평형상태에 있다고 가정하였으며, 냉난방시 사이클의 온도범위 및 용액 열교환기 유효율은 다음과 같다.

냉방 : $T_G = 30 \sim 140^\circ\text{C}$
 $T_C = 30 \sim 100^\circ\text{C}$
 $T_E = 2 \sim 10^\circ\text{C}$
 $T_A = 30 \sim 140^\circ\text{C}$

$$COP = Q_E / Q_G$$

난방 : $T_G = 30 \sim 140^\circ\text{C}$
 $T_C = 20 \sim 100^\circ\text{C}$
 $T_E = 10 \sim 90^\circ\text{C}$
 $T_A = 20 \sim 140^\circ\text{C}$

$$COP = (Q_A + Q_C) / Q_G$$

용액열교환기 유효율

$$\eta_I = \frac{H_5 - H_6}{H_5 - H_{6s}}, \quad \eta_{II} = \frac{H_7 - H_8}{H_7 - H_{8s}}$$

여기서 H_i 는 Fig. 2의 선도에서 i 지점의 엔탈피이며 H_{ij} 는 상태점 i 의 농도와 j 상태의 온도에 상응하는 엔탈피를 나타내며 열교환기의 유효율은 각각 0.9로 하였다.¹⁾

질량유량비는 다음과 같이 나타내었고 냉매 질량은 0.01 kg/s로 하였다.¹¹⁾

$$F_R = \text{흡수기로 유입되는 흡수액의 질량유량} / \text{냉매 질량 유량} = X_G / (X_G - X_A)$$

수치해석을 위한 사이클 모델링 방법은;

(1) 응축기내부 온도(T_C)로부터 제2발생기와 응축기내부의 압력을 계산하고, 증발기 내부 온도(T_E)로부터 흡수기 및 증발기 압력(P_E)을 계산하며 흡수기 온도(T_A)와 압력

(P_A)으로부터 평형농도(X_A)를 계산한다.

(2) 제2발생기 내부 평형 농도(X_{GC})를 가정하고, 제1발생기의 압력(P_G)과 내부평형 농도(X_G)로부터 제2발생기 평형 온도(T_{GC})를 계산한다.

(3) 발생기 온도(T_E)와 고압영역 압력치로부터 제1발생기의 평형농도를 계산하며 질량평형과 에너지 평형조건으로부터 각 지점의 상태치를 계산한다.

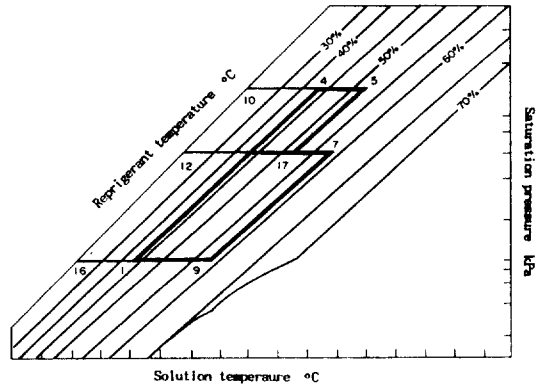


Fig. 2 Double-effect absorption heat pump cycle on P-T-X diagram for water-salt mixture

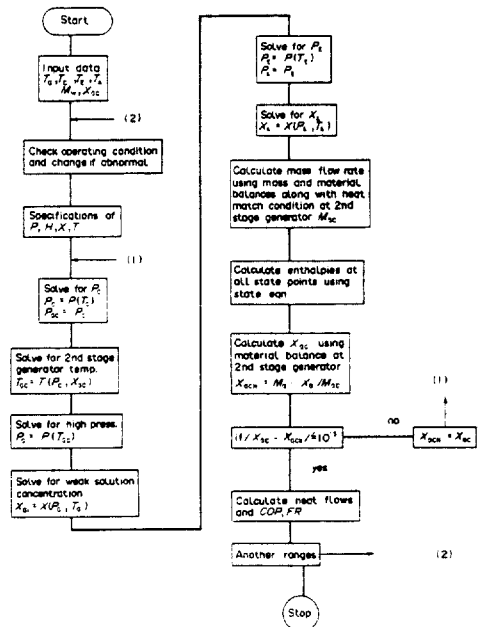


Fig. 3 Flow chart

(4) 제 2 발생기내의 질량 평형조건으로부터 가정한 제 2 발생기 내부 평형농도를 재 계산 (X_{GCN}) 하여 오차한계내에 수렴하면 계산을 종료하고 그렇지 않으면 (2)과정부터 다시 계산한다. 자세한 계산 순서는 Fig. 3의 계산 흐름도에 나타내었다.

3. 계산결과 및 해석

본 연구에서는 2중효용 시스템이 새로이 개발되고 있는 흡수액의 종류에 따른 성능을 비교하기 위하여 현재 실용화되어 있는 냉방시스템 뿐만 아니라 실용화될 가능성이 큰 난방시스템에 대하여 성능해석을 수행하였다. 사용된 작동매체는 현재 실용화되어 있는 LiBr 수용액에 대하여 LiCl 수용액, LiSCN-LiBr 수용액, LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액의 성능계수 및 질량유량비를 비교하였다.

Fig. 4는 응축기온도 40°C, 증발기 온도 6°C, 흡수기 온도 20°C인 경우에 대한 냉방 성능을 발생기 온도를 60°C에서 140°C까지 변화시켰을 때의 성능계수와 질량유량비를 비교한 것이다. 작동매체에 따라 작동 온도 영역이 다르기 때문에 비교적 유사한 영역의 계산값을 설정한 것이다. 성능계수를 비교하면 복합염 수용액과 LiBr-LiSCN 수용액이 거의 유사하게 성능이 우수하다는 것을 알 수 있으며 질량 유량비를 비교할 경우에는 거의 온도 변화에 따른 유량변화가 없는 LiBr-LiSCN 수용액이 우수하다는 것을 알 수 있다. 그리고 저온 영역에서는 1중 효용에 관한 기존의 연구(참고문헌 8)에서도 언급된 바와 같이 LiCl 수용액이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러나 LiCl 수용액은 결정석출 한계농도(약 40%)가 낮기 때문에 아주 좁은 영역의 온도 범위에서만 제한적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 LiBr-LiSCN 수용액은 성능 및 질량유량비 모두 현재 실용화되어 있는 LiBr 수용액 보다 성능이 월등히 우수함을 알 수 있다. 이러한 현상은 증발기 온도를 2~10°C까지 변화시킨 Fig. 5의 결과에서도 거의 같은 경향을 보이고 있다. Fig. 5

의 조건은 발생기의 온도를 80°C로 설정하였기 때문에 가스 적화식 시스템에 비하여 작동 온도가 낮은 폐열이나 태양열 등의 저온열을 사용하는 시스템에 관한 계산결과를 나타낸 것이다. 발생기 온도가 낮기 때문에 비교적 발생기 온도 영역이 고온인 복합염 수용액은 이러한 평형상태에서는 정상상태를 이루지 못하였다. 저온영역에서는 LiCl 수용액이 질량유량비 면에서 매우 우수하나 질량유량비와 성능

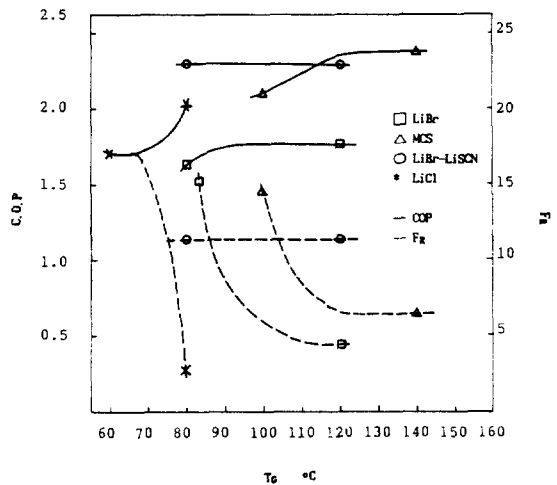


Fig. 4 COP and FR distribution at $60 \leq T_G \leq 140^\circ\text{C}$, $T_C = 40^\circ\text{C}$, $T_A = 20^\circ\text{C}$ for cooling

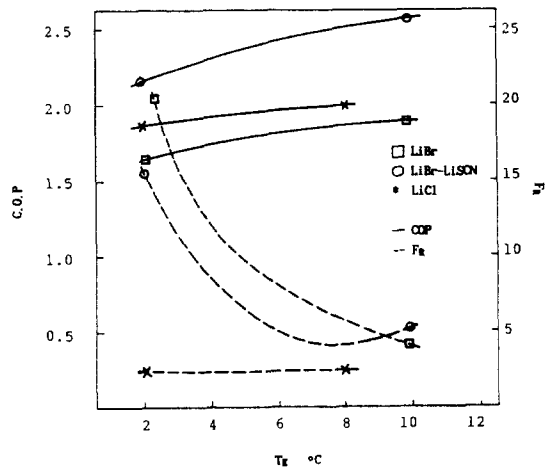


Fig. 5 COP and FR distribution at $2 \leq T_B \leq 10^\circ\text{C}$, $T_G = 80^\circ\text{C}$, $T_C = 40^\circ\text{C}$, $T_A = 20^\circ\text{C}$ for cooling

계수를 종합적으로 고려하는 경우에는 LiBr-LiSCN 수용액이 보다 우수함을 알 수 있다. 작동온도 영역에서의 시스템 구동 온도 범위가 상용화되어 있는 시스템보다 매우 넓기 때문에 상용화에 매우 유리하다. Fig. 5의 작동 조건은 발생기 온도 80℃, 응축기 온도 40℃, 흡수기 온도 20℃인 경우이다.

각 작동 매체에 관하여 난방 영역해석을 수행한 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. Fig. 6의 작동 온도 영역은 응축기온도 40℃, 증발기온도 30

℃, 흡수기온도 50℃이고 발생기 온도는 90℃에서 140℃까지 변화하였을 때의 해석 결과이고, Fig. 7은 응축기 온도 50℃, 증발기 온도 40℃, 흡수기 온도 60℃인 경우이다. LiCl 수용액은 작동온도 영역이 낮아서 평형 온도를 거의 구하기 어렵기 때문에 Fig. 6과 Fig. 7에서는 나머지 수용액에 대하여만 비교하였다. Fig. 6과 7은 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 성능계수는 LiBr-LiSCN 수용액, 복합염 수용액, LiBr 수용액의 순서로 높은 값을 나타내고 있으며, 질량유량비는 역순을 나타내고 있다. 따라서 난방시의 종합성능은 성능계수의 순서로 나타남을 알 수 있으며 복합염 수용액은 항상 3가지 수용액 중에서도 고온 영역에서 작동한다는 것을 알 수 있다. 또한 복합염 수용액은 냉방에서와는 달리 작동온도 범위가 매우 제한되기 때문에 저온영역에서의 상용화는 매우 어려울 것으로 생각된다.

4. 결 론

냉난방 2중 효율 시스템에 4가지 작동 매체에 대한 성능 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 냉난방 성능 모두 LiBr-LiSCN 수용액을 작동유체로 하였을 때 가장 우수한 성능을 나타내었으며 질량유량비도 가장 적합하였다.
- (2) 냉방성능은 LiCl 수용액, 복합염 수용액, LiBr-LiSCN 수용액 모두 상용화되어 있는 LiBr 수용액보다 우수한 성능을 나타내었다.
- (3) LiCl 수용액은 태양열 및 폐열회수 이용 등과 같은 저온열 이용 시스템에 비교적 적합하고 복합염 수용액, LiBr-LiSCN 수용액, LiBr 수용액은 비교적 고온인 가스 직화 시스템 등의 냉방에 유리하다.
- (4) 난방시스템의 적용시에는 LiCl 수용액은 거의 적용이 불가능하고, 나머지 LiBr-LiSCN 수용액이나 LiBr 수용액 모두 사용이 가능하나 복합염 수용액은 냉방의 경우와 마찬가지로 고온 영역에서 주로 사용되는 것이 유리한 것으로 나타났다.

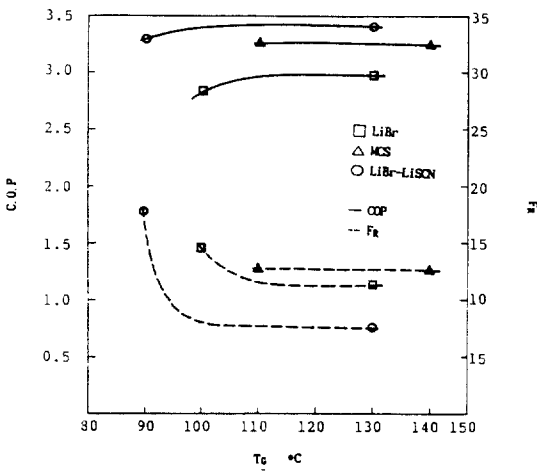


Fig. 6 COP and FR distribution at $60 \leq T_G \leq 140^\circ\text{C}$, $T_C=40^\circ\text{C}$, $T_E=30^\circ\text{C}$, $T_A=50^\circ\text{C}$ for heating

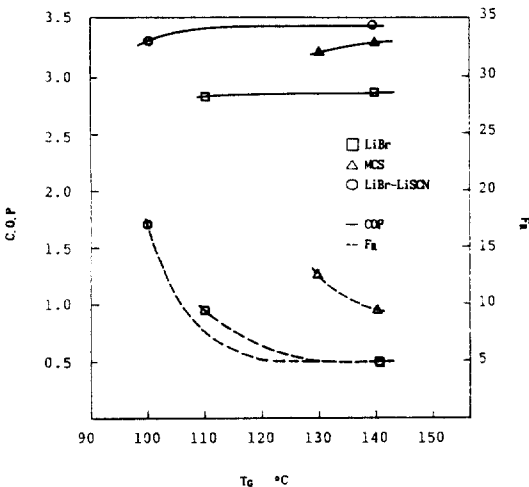


Fig. 7 COP and FR distribution at $60 \leq T_G \leq 140^\circ\text{C}$, $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_E=40^\circ\text{C}$, $T_A=60^\circ\text{C}$ for heating

참 고 문 헌

1. Kaushik, S.C. and Chandra, S., 1985, "Computer modeling and parametric study of a double-effect generation absorption refrigeration cycle," *Energy Convers. Mgmt* Vol. 25, pp. 9-14.
2. Grossman, G. and Michaelson, E., 1985, "A modular computer simulation of absorption system," *ASHRAE Trans.* HI-85-362, pp. 1808-1826.
3. 원승호, 이원용, 1989. "LiCl 수용액을 사용한 2중 효용 흡수식 히트펌프의 난방 성능해석, "대한기계학회 '89 추계 학술대회 초록집, pp.533~538.
4. 원승호, 이원용, 1991, "Thermodynamic design data for double-effect absorption heat pump systems using water – Lithium Chloride – cooling," *J. Heat Recovery System & CHP*, Vol. 11, No. 1, pp. 41-48.
5. 원승호, 이원용, 1990, "Simulation and Thermodynamic design data study on double-effect absorption cycle using water-LiBr-LiSCN," 대한기계학회 '90 추계 학술대회 논문집 (III), pp.259~264.
6. 원승호, 1991. "LiSCN 이 함유된 2중효용 흡수식 히트펌프의 난방성능해석", 대한기계학회 '91 추계 학술대회 초록집
7. Kaushik, S.C., 1988, "Modeling and simulation studies on single/double-effect absorption cycle using water – multicomponent salt (MCS) mixture," *Solar Energy*, Vol. 40, pp. 431-441.
8. 원승호, 이원용, 1989. "1, 2중 흡수식 히트펌프의 작동매체에 따른 성능해석(I)", 공기조화 냉동공학 논문집 제1권 3호, pp.219~227.
9. 원승호, 이원용, 1991, "Thermodynamic design data for double-effect absorption heat pump systems using water – Lithium Chloride – cooling," *J. Heat Recovery System & CHP*, Vol. 11, No. 1, pp. 41-48.
10. 원승호, 이훈, in press, "Simulation and thermodynamic design data study on double-effect absorption cooling cycle using water-LiBr-LiSCN mixture," *J. Heat Recovery System & CHP*.
11. Grover, G.S., Devotta, S. and Holland, F.A., 1988, "Thermodynamic design data for absorption heat pump systems operating on water lithium chloride- part one. Cooling," *J. Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 8, pp. 33-41.