

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂수용액을 사용하는 흡수식 2중효용 시스템에서 태양열을 증발기 열원으로 사용하는 난방기의 열역학적 해석

원승호

건양대학교 기계공학과(shwon@konyang.ac.kr)

Thermodynamic Analysis of a Double-Effect Absorption Heating System Using Water-LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ Solution at Solar Evaporator Heating

Won, Seung-ho

Dept. of Mechanical Engineering, Konyang University(shwon@konyang.ac.kr)

Abstract

In this paper, with water-LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ mixture which utilizes solar energy at the evaporator heat source, a thermodynamic analysis was performed to provide design data for a double-effect absorption heating system. A comparative study of the water-LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ mixture against the water-LiBr pair was conducted by a computer simulation. The computer simulation is based on mass, material and heat balance equations for each part of the system. Coefficients of performance and flow ratios for effects of different operating temperatures are investigated. It is found that the heating COP is higher for the water-LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ mixture than for the water-LiBr pair, and FR is lower for the former.

Keywords : 흡수식 히트펌프(absorption heat pump), 이중효용(double-effect), 증발기 난방(evaporator heating), 태양열(solar energy), LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액(mixture)

기 호 설 명

COP 성능계수(·)
h 엔탈피(kJ/kg)

\dot{m} 질량유동율(kg/sec)
FR 질량유량비 ($\frac{m_A}{m_W}$)

접수일자 : 2007년 7월 19일, 심사완료일자 : 2007년 9월 10일
교신저자 : 원승호(shwon@konyang.ac.kr)

P	압력(kPa)
Q	열량(kW)
T	온도(K 혹은 °C)
X	농도 백분율(%)
η	열교환 유효율

하첨자

A	흡수기
C	응축기
E	증발기
G	발생기
GC	제 2발생기
W	작동유체(물)

1. 서론

흡수식 냉난방시스템은 하나의 시스템으로 여름철에는 냉방, 겨울철에는 난방을 할 수 있는 복합시스템으로, 열에너지를 이용하기 때문에, 대형 건물에는 대부분 설치 운전되고 있으며, 중소규모의 건물에도 많이 채택하고 있는 냉난방 시스템이다. 냉방시스템으로는, 주 에너지원이 전기인 압축식 시스템과는 달리, 흡수식의 주 에너지원이 가스나 석유연료 등 열에너지이기 때문에 여름철 냉방부하 경감에 매우 유리하고, 흡수식 냉방시스템의 주 에너지원인 가스는, 난방을 하는 하절기가 비수기이기 때문에, 경제적으로도 유리하다. 난방시스템으로 흡수식은 압축식 시스템과는 달리 별도의 보일러를 설치할 필요 없이, 냉난방을 하나의 시스템으로 해결할 수 있다는 장점이 있다.

태양열을 이용하는 난방장치에 대한 연구는 기존에 많이 수행되었으나, 난방의 특성상 겨울철이기 때문에 태양열 집열판이, 평판형인 경우는 집열 온도가 낮거나 일사량이 충분치 않아서 직접 난방에 사용하기 어렵고, 집광형으로 제작된 경우에는 온도는 높지만 열량자체가 적기 때문에 보조 난방기기가 없이, 태양열만으로 난방에너지로 사용하기에 문제가 있었다. 그러나 발생기의 열원으

로 가스나 석유를 사용하고, 평판형이나 집광형에서 얻어진 열원을 증발기의 저온열원으로 사용하면, 응축열과 흡수열을 이용한 난방을 하는 경우에 이용효율을 극대화시킬 수 있다.

흡수식 냉난방 시스템에 관한 연구 분야 중에서, 작동 흡수액에 관한 많은 연구를 수행하고 있다. 1)2)3)4)5) 1940년대부터 많은 연구자들에 의해 LiBr 수용액에 관한 연구를 비롯하여 여러 가지 흡수액에 관한 연구를 수행하고 있다. 흡수액중에서 새로운 흡수액인 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 적용하고, 냉방 2중효용 시스템에 대한 연구는 Kaushik 등¹⁾에 의하여 수행되었다. 이 연구에서는 1, 2중효용 냉방에 관한 연구이었다.

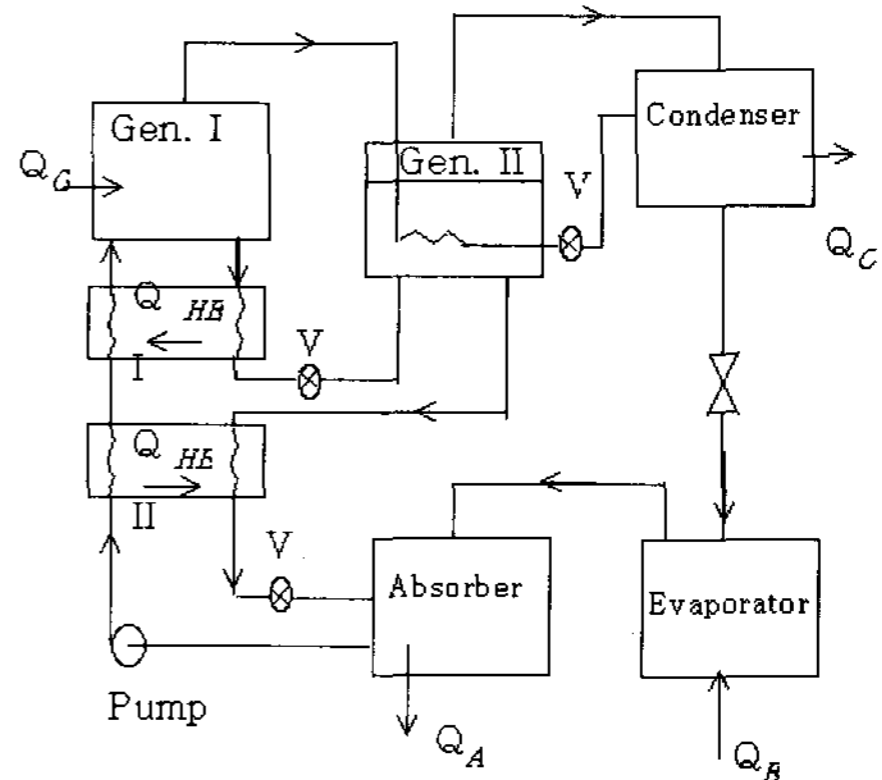


그림 1. 이중효용 흡수식 사이클

- 1) S. C. Kaushik et al., Modeling and simulation studies on single/double-effect absorption cycle using water-multicomponent salt (MCS) mixture. Solar Energy 1988, 40, 431-441
- 2) 원승호, 증발기 열원으로 태양열을 이용하며 LiSCN+BiBr 수용액을 사용하는 흡수식 2중효용 난방시스템의 열역학적 해석, 태양에너지학회 논문집, 2005, Vol.25, No.3, pp.27-35
- 3) S. Iyoki et al., Studies on the water-lithium bromide-lithium thiocyanate absorption refrigerating machine, Refrigeration (in Japan), 1981, Vol.56, pp. 27-39.
- 4) 원승호, 흡수식 2중효용 시스템의 증발기 열원으로 태양열을 이용하는 LiCl 수용액 난방시스템 해석, 태양에너지학회 논문집, 2004, Vol.24, No. 3, pp.39-46
- 5) S. H. Won et al., Simulation and thermodynamic design data study on double-effect absorption cooling cycle using water-LiBr-LiSCN mixture, Heat Recovery System & CHP, 1991, Vol.11, No.11, pp. 161-168

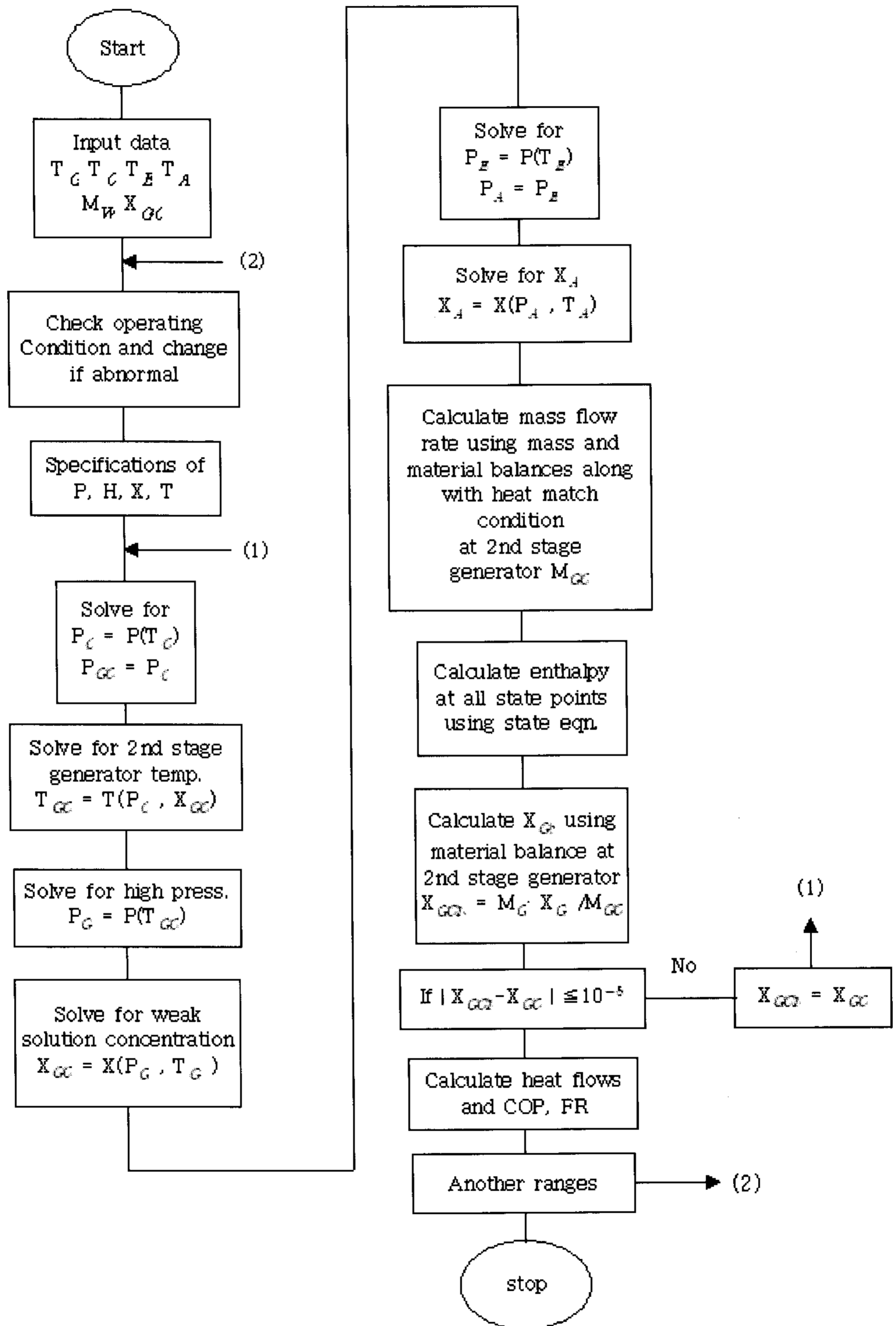


그림 2. 계산 흐름도

본 연구에서는, 저온열인 태양열을 증발기의 열원으로 사용하고, 발생기는 가스나 석유 등의 열원을 사용하며, 응축기와 흡수기에서 방출되는 열을 난방열로 사용하는 연구를 수행하고자 하였다. 새로운 작동 수용액인 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액의 물성은 Kaushik¹⁾의 연구결과를 사용하였고, 계산방법은 원²⁾⁴⁾⁵⁾, Kaushik⁶⁾의 계산방법을 사용하여, 2중효용 난방시스템의 성능을 분석하고자 하였다. 그리고 성능비교를 위해서 같은 조건에서 기존의 LiBr 수용액을 사용한 이중 효용 난방시스템에 대한 계산 결과와 비교하였다.

2. 작동원리 및 전산시뮬레이션

2중효용 흡수식 냉난방 시스템 작동 상태도는 그림 1에 나타나 있다. LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액과 냉매인 수증기의 방정식은 2중 효용 냉난방 사이클 해석을 수행한 Kaushik¹⁾, 원 등²⁾⁴⁾⁵⁾의 연구에 나타나 있다. 그리고 LiBr 수용액에 대한 물성 방정식은 ASHRAE handbook⁷⁾의 결과를 사용하였다.

작동온도 영역은 사이클을 구성하기 위하여 온도변화 조건을 만족하도록 하였고, 각 작동지점에서 시스템은 모두 정상상태로 주어지며, 난방성능을 해석하기 위한 시뮬레이션 수용액의 열역학적 작동 온도 상태는 다음과 같다.

발생기 온도 $T_G = 70 - 140 \text{ }^\circ\text{C}$
 응축기 온도 $T_C = 30 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$
 증발기 온도 $T_E = 2 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$
 흡수기 온도 $T_A = 30 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$
 냉매질량유량 0.01kg/sec

용액 열교환기의 효율 0.9

$$\text{질량유량비 } FR = \frac{m_A}{m_W} = X_G / (X_G - X_A)$$

질량유량비 FR은 냉매 질량유동율에 대한 흡수액 유동율의 비로써, 이 값이 크면 성능대비 흡수액 유동량이 많아지므로 배관의 크기가 커지고 시스템 자체가 커진다는 것을 의미한다. 그래서 성능이 우수하더라도 FR이 너무 크면 사용할 수 없다.

계산순서는 그림 2의 계산 유동도에 나타나 있고 수렴조건은 상대오차를 10^{-5} 으로 하였다.

그리고 발생기의 열원(Q_G)은 가스 혹은 석유 등을 사용하고, 증발기 열원(Q_E)은 태양열을 사용하며, 난방에 사용되는 에너지는 흡수열과 응축열($Q_A + Q_C$)이 된다. 따라서 사용되는 성능계수(COP)는 다음과 같다.

$$\text{COP} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_G}$$

3. 계산결과 및 고찰

LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하고 증발기온도가 2~ 40°C로 변화하는 경우와, 같은 조건에서 기존의 LiBr 수용액을 사용하는 각각의 경우에 대하여 발생기, 흡수기, 응축기 및 증발기의 평형온도를 변화시키고 수용액들의 작동제한 조건(결정 석출 등)을 만족하는 온도 상태에 대하여 성적계수, 농도, 질량 유동율 등을 계산하였다.

표 1은 응축기 평형온도가 30°C, 증발기 온도를 12°C, 흡수기 온도를 30°C로 하였을 때, 발생기 온도 변화에 따른 계산 값을 비교한 것이다. 성능계수는 LiBr 수용액을 사용하였을 때는 약 2.9정도를 나타내고 있으며 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 경우는 3.5정도로, LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 경우가 20% 정도

6) S.C. Kaushik. et al. Computer modeling and parametric study of a double effect generation absorption refrigeration cycle. Energy Convers. Mgmt. 1985, Vol.25, 00.9-14.

7) K. L. Bowlen, etc., Refrigerant tables and charts, ASHRAE handbook, 1989, pp.17.69-70

표 1. 발생기 온도를 변화시켰을 때의 계산결과 비교

T _G	T _C	T _E	T _A	LiBr 수용액					LiCl-CaCl ₂ -Zn(NO ₃) ₂ 수용액				
				COP	X	X _{G2}	X _A	FR	COP	X _G	X _{G2}	X _A	FR
80	30	12	30	2.8	49.0	50.5	47.5	16.4	3.4	42.0	44.3	40.3	10.9
90	30	12	30	2.9	50.6	54.0	47.5	8.2	3.5	43.3	47.6	40.3	6.5
100	30	12	30	2.9	52.1	57.3	47.5	5.9	3.5	44.3	50.3	40.3	5.0
110	30	12	30	2.9	53.4	60.3	47.5	4.7	3.6	45.0	52.6	40.3	4.3

우수하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 배관 크기 등을 결정하는 질량 유동을 FR은 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 시스템이 LiBr수용액을 사용하는 시스템에 비하여 작거나 비슷하게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

그림 3은 증발기 온도 20°C, 흡수기 온도 40°C, 응축기 온도 40°C이고, 발생기 온도는 70-140°C로 변화시켰을 때의 계산 결과이다. 전체적으로, 성적계수는 20% 이상 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용한 시스템이 우수하다는 것을 알 수 있으며, 또한 같은 영역에서의 질량유동율은 기존 LiBr 용액을 사용하는 것보다 약간 크게 나타나고 있지만 우수하다는 것을 알 수 있었다. 작동 온도 영역은 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용한 것이 LiBr 수용액을 사용한 것에 비해 10°C 높은 작동영역을 나타내고 있다.

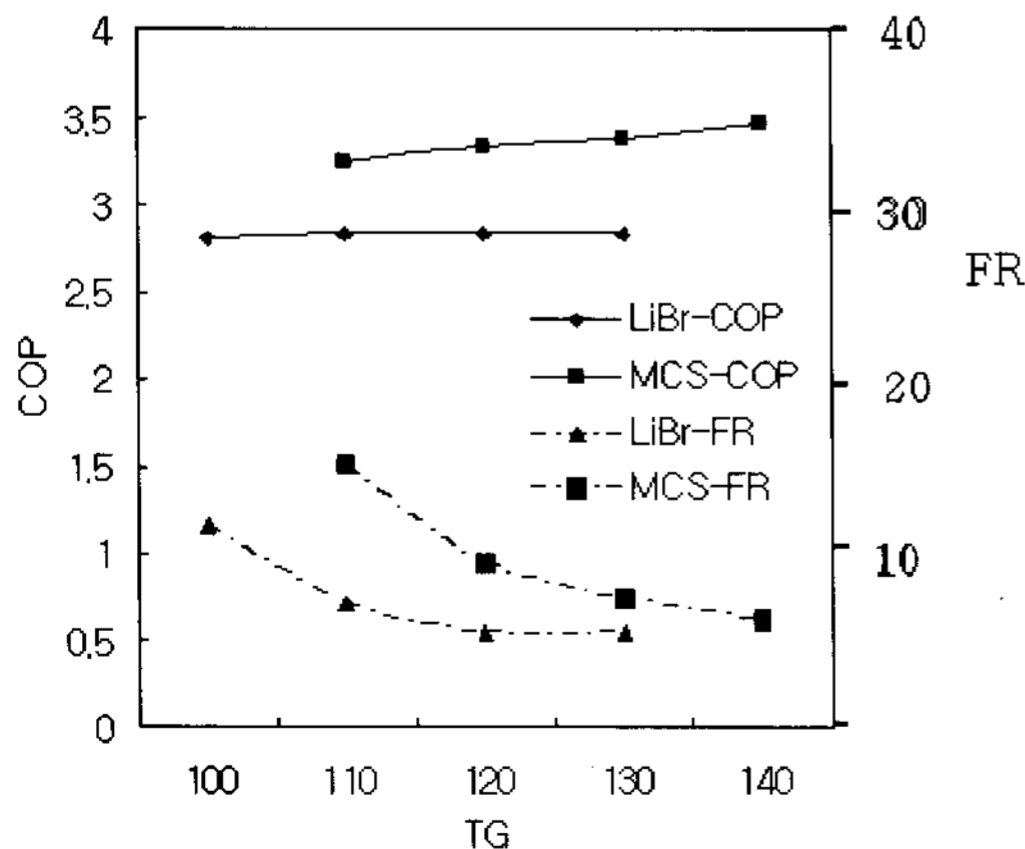


그림 3. 70 ≤ T_G ≤ 140°C, T_E = 20°C, T_A = 30°C, T_C = 40°C 일 때 COP 및 FR 변화

그림 4는 증발기 온도 30°C, 흡수기 온도 40°C, 응축기 온도 50°C이고, 발생기 온도를 70°C에서 140°C까지 변화시켰을 때의 수치계산 결과이다. 그림 3의 경우와 마찬가지로 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용한 경우가 기존의 LiBr 수용액을 사용한 것보다 20% 이상 성적계수가 증가했다는 것을 보여주며 이 영역에서도 질량유동율은 기존의 LiBr 수용액을 사용했을 때와 유사하게 나타나 우수하다는 것을 알 수 있었다.

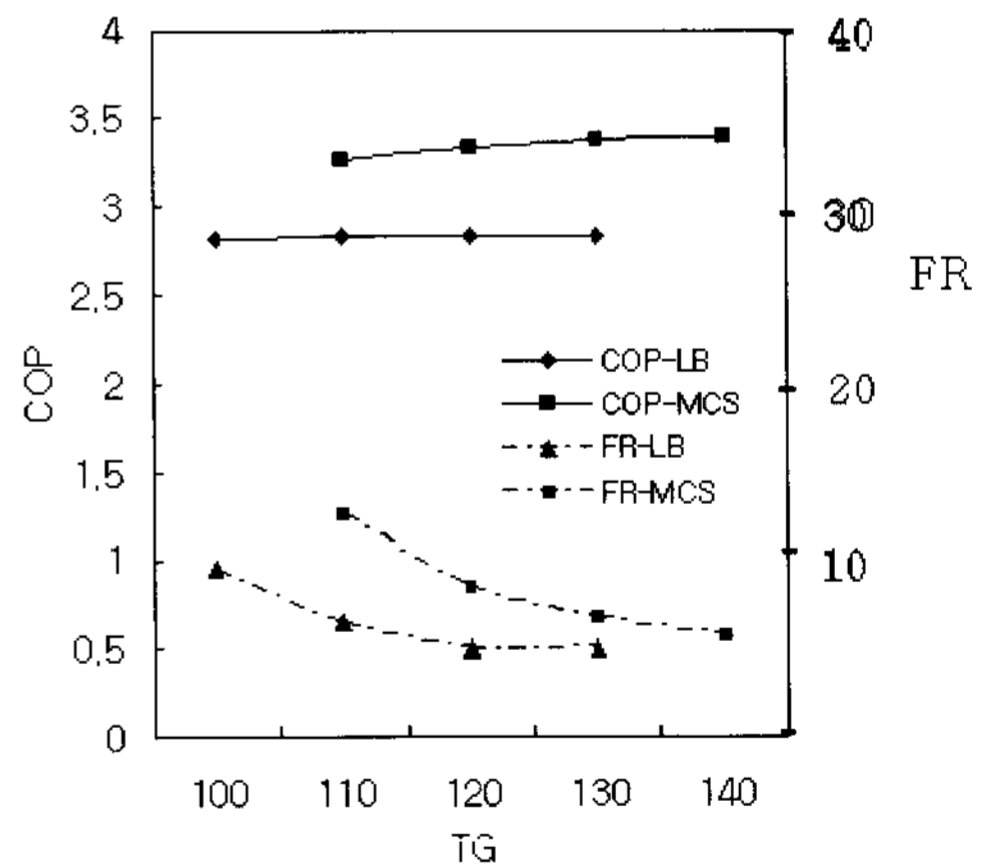


그림 4. 70 ≤ T_G ≤ 140°C, T_E = 30°C, T_A = 40°C, T_C = 50°C 일 때 COP 및 FR 변화

표 2에서의 계산결과를 보면, 작동 온도 영역은 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용한 경우와 기존의 LiBr 수용액만을 사용하는 경우를 비교하면 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액이 기존의 LiBr 수용액에 비하여 작동 온도 영역이 많이 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 배관 크기 등을 결정

하는 질량유동율은 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 경우와 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 전체적으로 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 경우의 성적계수가 3.1에서 3.5정도 이고 기존의 LiBr수용액을 사용하는 경우는 2.5에서 3.0정도를 나타내고 있어, 전체적으로 20% 정도 LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하는 경우가 높다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

이중효용 흡수식 시스템에 저온의 증발기 열원으로 태양열을 사용하는 난방시스템에 있어서, LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용한 경우의 열역학적 성능을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액을 사용하고, 저온(2 - 30℃)의 증발 열원으로 태양열을 사용하는 경우의 흡수식시스템의 난방 가능 온도 영역을 계산하였다.
- 2) LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액에 대한 성능 해석 결과, 성적계수의 경우는 기존의 LiBr 수용액을 사용하는 경우보다 평균 20%이상 높게 나타나고, 질량유량비는 기존의 LiBr 수용액을 사용하는 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 흡수식히트펌프를 이용한 태양열 이용 난방 시스템을 적용하는데 유리하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 새로운 수용액을 사용하기 위한 내부식성 실험이 더 필요하다.
- 3) LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂를 사용한 새로운 수용액의 난방 2중 효용 작동 온도 범위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 80 &\leq TG \leq 140 \text{ }^\circ\text{C} \\ 30 &\leq TC \leq 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ 4 &\leq TE \leq 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ 30 &\leq TA \leq 50 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3)$$

참고 문헌

1. 원승호, 흡수식 2중효용 시스템의 증발기 열원으로 태양열을 이용하는 LiCl 수용액 난방 시스템 해석, 한국태양에너지학회 논문집, 2004, Vol. 24, No. 3, pp.39 - 46
2. G. C. Vliet, et al., Water-lithium bromide double-effect absorption cooling cycle analysis, ASHRAE Trans., 1982, Vol. 88, No.1, pp. 811-823
3. 원승호 외, 흡수액으로 에틸렌 글리콜이 혼합되고 태양열을 이용한 이중효용흡수식 시스템의 냉방 특성해석, 한국태양에너지학회 논문집, 2003, Vol. 23, No. 4, pp.45 - 54
4. F. A. Holland, etc, Thermodynamic design data for absorption heat pump systems operating on water lithium chloride - part one. cooling, J. Heat Recovery systems & CHP, 1988, Vol. 8, No.1, pp. 33-41
5. S. H. Won, etc, Thermodynamic design data for double-effect absorption heat pump systems using water-lithium chloride - cooling, 1991, Heat Recovery Systems & CHP, Vol.11, No. 1, pp.41 - 48

표 2. LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액으로 계산된 설계 Data

T _G	T _C	T _E	T _A	COP	X _G	X _{GE}	X _A	FR	T _{GC}
120	30	4	30	3.0	49.7	51.1	48.7	22.0	62.7
110	30	6	30	3.1	48.0	49.9	46.7	15.7	60.8
120	30	6	30	3.2	48.8	51.8	46.7	10.1	64.0
140	40	6	30	2.9	47.7	49.1	46.7	20.6	74.0
100	30	8	30	3.2	46.3	48.4	44.6	12.7	58.5
110	30	8	30	3.3	47.1	50.7	44.6	8.3	62.1
120	30	8	30	3.4	47.9	52.7	44.6	6.5	65.5
130	40	8	30	3.2	46.2	48.3	44.6	13.2	72.4
140	40	8	30	3.3	46.7	49.8	44.6	9.6	75.5
90	30	10	30	3.3	44.3	46.7	42.5	11.2	55.8
100	30	10	30	3.4	45.3	49.3	42.5	7.2	59.8
110	30	10	30	3.4	46.1	51.6	42.5	5.6	63.6
120	30	10	30	3.5	46.8	53.6	42.5	4.8	67.1
110	40	10	30	3.2	43.7	45.4	42.5	15.8	67.0
120	40	10	30	3.3	44.5	47.3	42.5	9.7	70.6
130	40	10	30	3.4	45.2	49.1	42.5	7.4	73.9
140	40	10	30	3.4	45.7	50.6	42.5	6.2	77.1
140	50	10	30	3.0	43.4	44.6	42.5	20.9	80.8
80	30	12	30	3.4	42.0	44.3	40.3	10.9	52.7
90	30	12	30	3.4	43.3	47.6	40.3	6.5	57.1
100	30	12	30	3.5	44.2	50.2	40.3	5.0	61.3
110	30	12	30	3.5	45.0	52.5	40.3	4.2	65.2
120	30	12	30	3.5	45.7	54.7	40.3	3.7	68.9
100	40	12	30	3.3	41.8	43.8	40.3	12.2	64.6
110	40	12	30	3.4	42.7	46.2	40.3	7.7	68.5
120	40	12	30	3.5	43.4	48.2	40.3	6.0	72.2
130	40	12	30	3.5	44.0	49.9	40.3	5.1	75.7
140	40	12	30	3.5	44.5	51.5	40.3	4.5	79.0
120	50	12	30	3.0	41.0	41.9	40.3	24.9	75.6
130	50	12	30	3.3	41.7	43.8	40.3	12.4	79.1
140	50	12	30	3.4	42.3	45.4	40.3	8.8	82.4
120	30	14	40	3.0	49.5	51.2	48.4	18.0	62.9
110	30	16	40	3.2	47.9	50.0	46.4	14.0	60.9
120	30	16	40	3.2	48.7	51.9	46.4	9.4	64.2
140	40	16	40	3.0	47.5	49.2	46.4	17.8	74.2
100	30	18	40	3.2	46.2	48.5	44.5	11.9	58.6
110	30	18	40	3.3	47.1	50.8	44.5	8.0	62.2
120	30	18	40	3.3	47.8	52.7	44.5	6.3	65.6
120	40	18	40	3.0	45.4	46.7	44.5	21.1	69.3
130	40	18	40	3.2	46.1	48.4	44.5	12.3	72.5
140	40	18	40	3.2	46.7	49.9	44.5	9.2	75.6
90	30	20	40	3.3	44.2	46.7	42.4	10.8	55.9
100	30	20	40	3.4	45.3	49.3	42.4	7.1	59.9
110	30	20	40	3.4	46.1	51.6	42.4	5.6	63.6
120	30	20	40	3.4	46.8	53.6	42.4	4.7	67.1
110	40	20	40	3.2	43.7	45.4	42.4	15.0	67.1
120	40	20	40	3.3	44.5	47.4	42.4	9.5	70.7
130	40	20	40	3.3	45.1	49.1	42.4	7.3	74.0
140	40	20	40	3.4	45.7	50.6	42.4	6.1	77.2

표 2. LiCl-CaCl₂-Zn(NO₃)₂ 수용액으로 계산된 설계 Data

T _G	T _C	T _E	T _A	COP	X _G	X _{GE}	X _A	FR	T _{GC}
140	50	20	40	3.0	43.3	44.7	42.4	19.6	80.9
80	30	22	40	3.3	42.0	44.3	40.2	10.8	52.7
90	30	22	40	3.4	43.3	47.6	40.2	6.5	57.1
100	30	22	40	3.4	44.2	50.2	40.2	5.0	61.3
110	30	22	40	3.5	45.0	52.5	40.2	4.2	65.2
120	30	22	40	3.5	45.7	54.7	40.2	3.8	68.8
100	40	22	40	3.3	41.8	43.9	40.2	12.1	64.6
110	40	22	40	3.4	42.7	46.2	40.2	7.7	68.5
120	40	22	40	3.4	43.4	48.2	40.2	6.0	72.2
130	40	22	40	3.5	44.0	49.9	40.2	5.1	75.7
140	40	22	40	3.5	44.5	51.4	40.2	4.6	79.0
120	50	22	40	3.0	41.0	41.9	40.2	24.6	75.7
130	50	22	40	3.2	41.7	43.8	40.2	12.3	79.1
140	50	22	40	3.3	42.3	45.4	40.2	8.8	82.4
110	30	24	50	3.0	48.4	49.6	47.6	25.4	60.2
120	30	24	50	3.1	49.2	51.5	47.6	13.2	63.4
130	40	26	50	3.0	46.6	47.9	45.8	22.7	71.6
140	40	26	50	3.1	47.3	49.4	45.8	13.6	74.7
120	40	28	50	3.1	45.1	46.8	43.9	16.0	69.7
130	40	28	580	3.2	45.8	48.6	43.9	10.5	72.9
140	40	28	50	3.3	46.4	50.1	43.9	8.1	76.0
110	40	30	50	3.2	43.5	45.6	42.0	12.7	67.4
120	40	30	50	3.3	44.3	47.5	42.0	8.5	70.9
130	40	30	50	3.3	44.9	49.2	42.0	6.7	74.3
140	40	30	50	3.4	45.5	50.8	42.0	5.7	77.5
140	50	30	50	3.1	43.1	44.8	42.0	15.9	81.2

Appendix LiCl-CaCl₂- Zn(NO₃)₂ 수용액의 물성방정식(본문 참고문헌 1)

1. 압력 - 온도 - 농도 관계식

$$p = (a_1 + a_2 \cdot X + a_3 \cdot X^2 + a_4 \cdot X^3) + (b_1 + b_2 \cdot X + b_3 \cdot X^2 + b_4 \cdot X^3) \cdot T + (c_1 + c_2 \cdot X + c_3 \cdot X^2 + c_4 \cdot X^3) \cdot T^2$$

$$a_1 = 6.47 \quad a_2 = 10.323 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = -0.859 \times 10^{-2}, \quad a_4 = 0.886 \times 10^{-4}$$

$$b_1 = -0.401, \quad b_2 = -0.53 \times 10^{-2}$$

$$b_3 = 4.82 \times 10^{-4}, \quad b_4 = -4.95 \times 10^{-6}$$

$$c_1 = 0.0108, \quad c_2 = 5.64 \times 10^{-5}$$

$$c_3 = -9.7 \times 10^{-6}, \quad c_4 = 1.02 \times 10^{-7}$$

X : 농도 %, p : 압력 kPa T : 온도 °C

2. 엔탈피 - 농도 - 온도 관계식

$$\begin{aligned}
 h &= (a_1 + a_2 \cdot X + a_3 \cdot X^2) \\
 &+ (b_1 + b_2 \cdot X + b_3 \cdot X^2) \cdot (T + 273.15) \\
 &+ (c_1 + c_2 \cdot X + c_3 \cdot X^2) \cdot (T + 273.15)^2
 \end{aligned}$$

$$a_1 = -387.172, \quad a_2 = -305.05589$$

$$a_3 = -412.11349$$

$$b_1 = 2.0272525, \quad b_2 = 0.6964813$$

$$b_3 = 2.1675358$$

$$c_1 = 3.4106805 \times 10^{-3}, \quad c_2 = -1.030517 \times 10^{-2}$$

$$c_3 = 4.4797589 \times 10^{-2}$$

h : 엔탈피 kJ/kg X : 농도 % T : 온도 °C