확산형 흡수식 냉장고의 사이클 해석

김 선 창†, 김 영 률, 백 종 현, 박 승 상
한국생산기술연구원 신에너지환경팀

Cycle Analysis of Diffusion Absorption Refrigerator

Seon-Chang Kim†, Young-Lyoul Kim, Jong-Hyun Peck, Seung-Sang Park
Advanced Energy & Environment Research Team, KITECH, Chonan 330-825, Korea

(Received April 3, 2002; revision received August 23, 2002)

ABSTRACT: A diffusion absorption refrigerator is a heat-generated refrigeration system. It uses a three-component working fluid consisting of the refrigerant (ammonia), the absorbent (water) and the auxiliary gas (typically hydrogen). This system has no moving parts and the associated noise and vibration. In this study, the operating characteristics of diffusion absorption refrigerator are investigated through cycle modeling and simulation. System parameters considered in this study are the charged concentration of ammonia aqueous solution, the concentration difference between absorber inlet and outlet and the system pressure determined by the amount of auxiliary gas charged. It was found that there exists a critical value of concentration difference that maximizes the refrigerating capacity. And the lower the system pressure, the higher the refrigerating capacity.

Key words: Diffusion absorption refrigerator(확산형 흡수식 냉장고), Auxiliary gas(보조가스), Ammonia aqueous solution(암모니아 수용액)

기 호 설 명

h : 엔탈피 [kJ/kg]
m : 질량유량 [g/s]
P_H : 보조가스 봉입압력 [bar]
P_L : 암모니아의 증발압력 [bar]
Q : 건도 [kg/kg]
Q_{abs} : 흡수기에서의 방열량 [W]
Q_{con} : 응축기에서의 방열량 [W]
Q_{des} : 발생기 입력열량 [W]
Q_{eva} : 냉동능력 [W]
Q_{rec} : 정류기에서의 방열량 [W]
T : 온도 [℃]
X : 암모니아 수용액 농도 [%/100]
X_H : 암모니아 농용액 농도 [%/100]
X_L : 암모니아 희농용액 농도 [%/100]
ΔX : 농용액과 희용액의 농도차 [%/100]

그리스 문자

ε_{shx} : 용액 열교환기 효율 [-]

하첨자

con : 응축기(condenser)
des : 발생기(desorber)
eva : 증발기(evaporator)

† Corresponding author
Tel.: +82-41-589-8353; fax: +82-41-589-8330
E-mail address: kimsc@kitech.re.kr

rec : 정류기(rectifier)

1. 서 론

확산형 흡수식 냉장고는 일반적인 흡수식 냉동기와는 달리 냉매(암모니아), 흡수제(물) 및 보조가스(수소 혹은 헬륨 등)로 구성된 3-성분의 작동매체를 사용하고 있다. 냉매인 암모니아는 일반적인 냉동기에서의 냉매와 마찬가지로 열을 저온부에서 고온부로 이동시키는 열매체의 역할을 하며, 흡수제인 물은 저온 · 저압부(암모니아의 분압)에서 기체상태인 냉매를 흡수한 후, 고온 · 고압부(암모니아의 분압)에서 다시 냉매를 흡수용액으로부터 분리시키는 역할을 한다. 보조가스는 시스템 내의 압력(암모니아의 분압+보조가스의 분압)을 전체적으로 일정하게 유지시켜 주는 역할을 하며, 이로 인하여 저양정의 기포펌프로도 암모니아의 분압이 낮은 흡수기에서 암모니아의 분압이 높은 발생기로의 암모니아 수용액 순환이 가능하게 된다.[1]

확산형 흡수식 냉동 사이클은 열구동에 의한 기포펌프를 사용하기 때문에 기계적 구동부가 사용되지 않으며, 이로 인하여 완전 무진동 · 무소음화가 가능하다는 장점이 있다. 따라서 확산형 흡수식 냉장고는 이러한 장점 때문에 정숙한 운전이 요구되는 호텔 객실용 냉장고로 널리 사용되고 있으며, 기포펌프의 열원으로 DC전원 히터 및 가스의 사용이 가능하기 때문에 레저용 자동차 냉장고 시장에도 널리 보급되고 있다.

또한, 확산형 흡수식 냉동 사이클은 신뢰성과 내구성이 우수하고, 유지비가 적을 뿐만 아니라 비 CFC계 냉매를 사용하여 지구 온난화 및 오존층 파괴 등과 같은 환경문제에도 적극적인 대처가 가능하다.

奥田英明[2]은 30 L급 확산형 흡수식 냉장고에 대한 실험을 수행하여 보조가스인 수소의 봉입압력은 1.7 MPa, 암모니아 용액의 충진농도는 34%, 그리고 발생기 입력열량은 85 W가 최적운전조건임을 발표하였다. Narayankhedkar and Maiya[3]는 이론해석을 통하여 보조가스의 봉입압력이 일정한 경우 최대의 냉장효과를 얻을 수 있는 최적의 입력열량이 존재함을 밝혔다. Kim et al.[4]은 확산형 흡수식 사이클을 이용한 호텔용 룸에어컨 개발을 위하여 확산형 흡수식 사이클에 대한 사이클 시뮬레이션을 수행한 바 있으며, 그 결과 냉동능력 37 W일 때, 0.183의 COP를 얻을 수 있음을 보고하였다.

지금까지 국내에서는 확산형 흡수식 사이클과 관련된 구체적인 연구결과는 보고된 바가 없으며, 이현경 등[5]이 확산형 흡수식 냉동기용 기포펌프의 운전특정에 관한 연구결과를 발표하였을 뿐이다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 EES (Engineering Equation Solver)를 이용하여 확산형 흡수식 냉장고의 사이클 해석을 수행하였으며, 보조가스의 봉입압력과 암모니아 수용액의 충진농도 등 설계조건의 변경에 따른 시스템의 성능을 예측하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 확산형 흡수식 사이클 개요

확산형 흡수식 냉장고는 발생기(desorber), 정류기(rectifier), 응축기(condenser), 증발기(evaporator), 흡수기(absorber) 및 용액 열교환기(solution heat exchanger) 등의 6개의 열교환기로 이루어져 있다.

Fig. 1은 확산형 흡수식 냉장고의 시스템 개략도를 암모니아 수용액의 평형상태도 상에 표시한 것이다. 그림에서 횡축은 암모니아 수용액의 온도를 나타내며, 종축은 시스템의 전체 압력이 아닌 암모니아의 분압을 나타낸다. 대각선 방향의 축은 암모니아 수용액의 농도를 나타내는 선이며, 응축기와 증발기가 위치한 좌측은 100%의 암

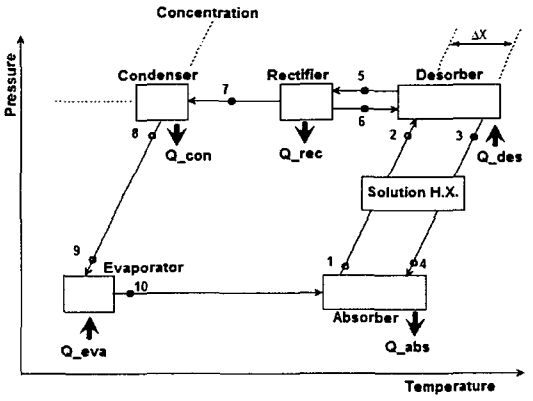

Fig. 1 Schematic diagram of diffusion absorption cycle on the equilibrium chart.

모니아를 나타내고 우측으로 갈수록 암모니아 수용액의 농도가 낮아진다.

발생기에서는 외부로부터 열을 흡수하여 암모니아 증기를 발생시키며(2→3), 정류기에서는 외부로 열을 빼앗겨 암모니아 증기에 포함된 수증기를 응축시킨다. 응축된 수증기는 발생기로 되돌아가며(6), 농도가 더욱 진해진 암모니아 증기는 응축기로 흐른다(7). 응축기에서 응축된(7→8) 암모니아는 증발기에서 외부의 열을 빼앗아 증발한다(9→10). 증발기에서 증발한 암모니아 증기는 흡수기로 들어가 발생기로부터 유입된(3→4) 암모니아 희용액에 흡수되며(4→1), 암모니아 증기를 흡수하여 농도가 진해진 암모니아 농용액은 용액 열교환기를 거쳐(1→2) 발생기로 들어간다. 용액 열교환기는 발생기로부터 나온 고온의 암모니아 희용액과 흡수기로부터 나온 저온의 암모니아 농용액을 열교환시켜, 발생기에 유입되는 암모니아 농용액의 온도를 높여 줌으로써, 발생기에서의 가열량을 줄여 준다.

2.2 작동조건

해석 대상의 확산형 흡수식 냉장고 약 60 L급의 냉장고로 설정하였으며, 발생기 히터에 공급되는 열량은 200 W로 설정하였다. 용액 열교환기의 효율은 40%로 하였으며, 시스템에 충진되는 암모니아 수용액의 농도는 30%를 기준조건으로 설정하였다.[4] 그외 사이클 해석의 기준조건과 변수의 범위를 Table 1에 나타내었다.

2.3 모델링

일반적으로 흡수식 시스템의 사이클 해석에는 사이클의 각 상태점에서의 평형방정식들만을 고려하는 방법과 UA값을 고려하는 방법이 있다. 첫번째 방법은 시스템을 구성하는 열교환기 등에 대한 제원이 결정되지 않은 상태에서 시스템의 열역학적인 상태만을 고려하여 해석을 수행하는 방법으로 이는 주로 최적의 사이클을 선정하는 목적으로 주로 사용된다. 두번째는 각 열교환기의 UA값을 주고 UA값의 변화에 따라 시스템의 성능변화를 예측하는 방법으로 이는 시스템의 열역학적 설계가 완료된 후, 시스템을 구성하는 열교환기의 열전달 면적, 작동매체의 유량 및 열전달계수 등이 어느 정도 정해졌을 경우, 열전달 면적, 혹은 기타 운전조건 등이 변화할 때, 이들의 변화에 따른 시스템의 특성을 예측하고자 하는 경우에 사용된다.

Table 1 Nominal conditions and ranges of parameters

Parameter	Nominal condition	Range
Concentration difference, ΔX	10%	5~15%
Charging concentration (rich solution), X_H	30%	27~37%
Charging pressure, P_H	25 bar	20~30 bar

본 연구는 확산형 흡수식 냉장고 개발에 앞서 확산형 흡수식 냉장고의 운전특성 및 기초설계 자료확보를 위하여 수행된 것으로 각 상태점에서의 평형방정식만을 이용하여 모델링하였다.

따라서 주어진 설정조건에서 사이클 각 상태점에서의 운전조건은 다음의 평형방정식으로부터 구하였으며, 시스템의 각 구성요소는 정상상태로 가정하였다. 확산형 흡수식 냉장고의 사이클 시뮬레이션을 통하여 해석하기 위해서는 각 열교환기에서의 연속방정식(mass balance equation), 에너지 평형방정식(energy balance equation) 및 상태방정식(state equation) 등이 사용되며, 계산의 단순화를 위하여 다음과 같은 가정들을 도입하였다.

(1) 정류기를 나와 응축기로 들어가는 암모니아 증기의 농도는 100%이다.

(2) 증발기에서 액상의 암모니아는 100% 증발한다(건도=1).

(3) 흡수기에서 나오는 암모니아 수용액은 열역학적 평형상태이다.

(4) 증발기에 유입된 암모니아는 응축압력에서의 포화액이다.

(5) 각 열교환기 내부에서의 질량변화는 없다.

(6) 관내에서의 압력손실 및 외부로의 열손실은 없다.

설정조건에서 사이클의 각 상태점에서 해당하는 연속방정식(mass balance equation), 에너지 평형방정식(energy balance equation) 및 상태방정식(state equation)은 다음과 같다.

(1) 증발기

연속방정식

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \tag{1}$$

에너지 평형방정식

$$Q_{eva} = \dot{m}_{10} \cdot [h_{10} - h_9] \quad (2)$$

상태방정식

$$h_9 = f(P_9, X_9, Q_9) \quad (3)$$

$$h_{10} = f(P_{10}, X_{10}, Q_{10}) \quad (4)$$

(2) 흡수기

연속방정식

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_4 = \dot{m}_1 \quad (5)$$

$$\dot{m}_{10} X_{10} + \dot{m}_4 X_L = \dot{m}_1 X_H \quad (6)$$

에너지 평형방정식

$$Q_{abs} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_1 h_1 \quad (7)$$

상태방정식

$$h_1 = f(T_1, X_1, Q_1) \quad (8)$$

(3) 응축기

연속방정식

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (9)$$

에너지 평형방정식

$$Q_{eva} = \dot{m}_7 \cdot [h_7 - h_8] \quad (10)$$

상태방정식

$$h_8 = f(P_8, X_8, Q_8) \quad (11)$$

(4) 발생기

연속방정식

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_2 = \dot{m}_5 + \dot{m}_3 \quad (12)$$

$$\dot{m}_6 X_6 + \dot{m}_2 X_H = \dot{m}_5 X_5 + \dot{m}_3 X_L \quad (13)$$

에너지 평형방정식

$$Q_{des} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_6 h_6 \quad (14)$$

(5) 정류기

연속방정식

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_6 = \dot{m}_5 \quad (15)$$

$$\dot{m}_7 X_7 + \dot{m}_6 X_6 = \dot{m}_5 X_5 \quad (16)$$

에너지 평형방정식

$$Q_{rec} = \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_6 h_6 \quad (17)$$

상태방정식

$$T_6 = f(P_6, h_6, X_6) \quad (18)$$

(6) 용액 열교환기

연속방정식

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (19)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (20)$$

에너지 평형방정식

$$Q_{shx} = \dot{m}_1 \cdot [h_2 - h_1] \quad (21)$$

$$Q_{shx} = \dot{m}_3 \cdot [h_3 - h_4] \quad (22)$$

상태방정식

$$T_2 = f(P_2, h_2, X_2) \quad (23)$$

$$T_4 = f(P_4, h_4, X_4) \quad (24)$$

용액 열교환기 효율

$$\varepsilon_{shx} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} \quad (25)$$

(7) 시스템의 성적계수

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_{des}} \quad (26)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 암모니아 수용액의 충진농도에 의한 영향

암모니아 수용액의 충진농도가 27%에서 37%까지 증가할 경우, 각 열교환기기에서의 열전달량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 보조가스의 봉입압력은 25 bar이며, 흡수기 입출구에서 암모니아 수용액의 농도차는 10%로 설정하였다. 암모니아 수용액의 충진농도가 증가함에 따라 정류기를 제외한 모든 열교환기기에서의 열전달량은 증가함을 알 수 있다. 이는 충진농도가 증가하면 발생기에서 발생되는 암모니아 증기의 발생량이

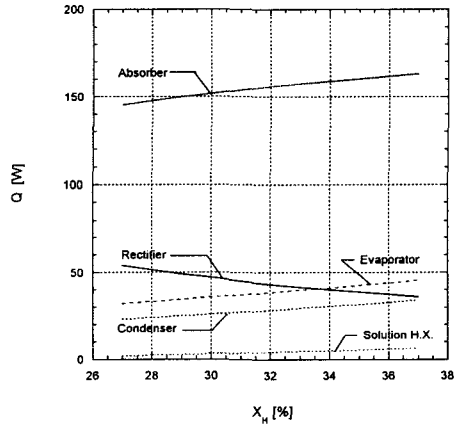

Fig. 2 Effects of charged concentration on the heat transfer rates at each heat transfer unit.

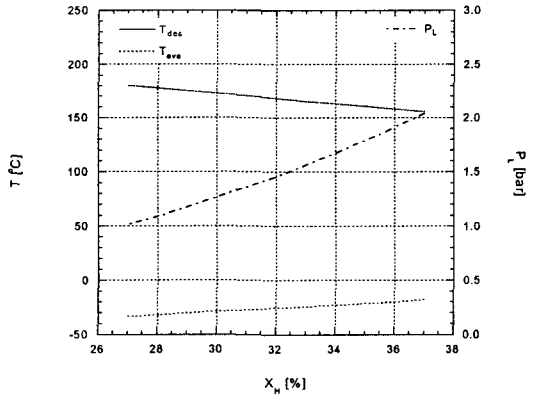

Fig. 3 Effects of charged concentration on the temperatures at desorber and evaporator and evaporating pressure.

증가하고 결과적으로 전체 시스템을 순환하는 작동매체의 유량이 증가하기 때문이다. 한편 충진농도가 높을수록 발생기에서 발생되는 암모니아 증기의 농도가 높아지므로 상대적으로 암모니아와 함께 증발되는 수증기의 함량이 감소하고 따라서 정류기에서 수증기를 응축시키는 데 필요한 열량은 감소하게 된다.

Fig. 3은 충진농도의 증가에 따른 발생기와 증발기의 온도 및 증발압력의 변화를 나타내고 있다. 여기서 증발압력은 증발기 내의 전체 압력이 아니라 암모니아 증기의 분압을 의미한다. 충진농도가 증가함에 따라 발생기에서의 온도는 감소하고, 증발온도와 증발압력은 증가함을 알 수 있다.

이와 같은 이유는 Fig. 4를 통하여 설명될 수 있다. Fig. 4는 충진농도가 증가한 경우에 대한 사이클의 변화를 나타내고 있다. 시스템 전체의 압력(P_H)이 일정하고 흡수기 입출구에서의 농도차가 일정한 경우, 흡수기에 충진된 암모니아 수용액의 농도가 증가하면($X_H \rightarrow X_H'$) 발생기에서의 농도 역시 증가하며 암모니아 수용액의 평형상태도에 의하여 발생기 출구에서의 온도는 감소한다($T3 \rightarrow T3'$). 한편 흡수기 출구온도($T1$)가 일정한 경우 흡수기 내부에서 암모니아의 분압은 상승하게 되고 결과적으로 증발기에서의 증발압력의 상승($P_L \rightarrow P_L'$)과 더불어 증발온도도 상승($T10 \rightarrow T10'$)하게 된다.

결과적으로 암모니아 수용액의 충진농도를 증가시키면 증발기에서의 증발열량, 즉 냉장능력은 증가하나 증발온도의 상승으로 인하여 냉장고 내 온도가 상승하는 단점이 있음을 알 수 있다.

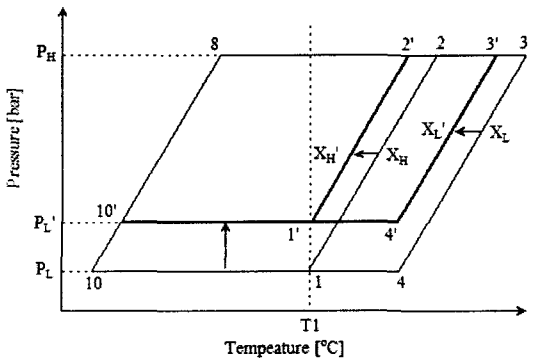

Fig. 4 Cycle shift according to the increase of charged concentration.

3.2 암모니아 수용액의 농도차에 의한 영향

Fig. 5는 충진농도가 27%, 30% 및 33%일 경우 흡수기 입출구에서 암모니아 수용액의 농도차 증가에 따른 증발열량, 즉 냉장능력의 변화를 나타내고 있다. 암모니아 수용액의 농도차가 5%에서 15%까지 증가함에 따라 확산형 흡수식 냉장고의 냉장능력은 증가하다가 임의의 농도차에서 최대값을 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 충진농도가 27%인 경우에는 농도차가 11%에서 냉장능력 32.13 W로 최대값을 나타내었으며, 충진농도가 30% 및 33%인 경우에는 농도차가 12%일 때, 냉장능력이 각각 36.31 W 및 41.00 W의 최대값을 나타내었다. 이 경우 발생기의 입열량이 200 W임을 고려하면 각각의 경우에 대한 확산형 흡수식 냉장고의 성적계수(COP)는 0.161, 0.182 및 0.205로 일반적인 흡수식 사이클의 성적계수에 비하여 매우 낮음을 알 수 있다.

3.3 보조가스 봉입압력에 의한 영향

확산형 흡수식 시스템의 작동매체는 암모니아, 물 및 보조가스로 먼저 암모니아 수용액과 암모니아 가스를 주입한 후 보조가스를 주입하며, 이때 시스템 내부의 압력은 냉매인 암모니아의 분압과 보조가스 분압의 합이 된다. 암모니아 수용액의 충진농도가 30%이고 주위온도가 25℃라고 가정하면 시스템 내 암모니아의 분압은 0.9 bar가 되며, 시스템의 전체압력이 설계압력이 될 때까지 보조가스를 충진한다. 즉 설계압력이 25 bar라고 가정하면 시스템 내의 압력이 25 bar가 될 때까지 보조가스를 충진하며, 이때 보조가스의 분압은 24.1 bar가 된다. 이와 같이 확산형 흡수식 시스템 내 압력은 대부분이 보조가스 충진량에 의하여 결정되기 때문에 보조가스의 충진량은 시스템의 성능에 중요한 변수가 되며, 본 연구에서 보조가스의 봉입압력이라 함은 시스템 내 보조가스의 분압을 일컫는 것이 아니고 편의상 보조가스 충진 후의 압력, 즉 시스템 전체압력을 지칭하기로 한다.

Fig. 6은 충진농도가 27%, 30% 및 33%일 경우 보조가스 봉입압력의 증가에 따른 냉장능력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 보조가스의 봉입압력이 20 bar에서 30 bar까지 증가함에 따라 확산형 흡수식 냉장고의 냉장능력은 감소하는 경향을 보이고 있다.

확산형 흡수식 시스템이 작동을 개시하여 시스템이 정상상태에 도달하면 발생기 내부는 암모니아 증기로 채워지고 보조가스는 흡수기와 증발기로 밀려난다. 따라서 발생기의 압력은 암모니아의 분압으로만 형성되며, 이때 발생기 내의 압력은 보조가스의 봉입압력보다 일정량의 높은 값을 갖게 된다. 단, 본 해석에서는 작동중 발생기 내의 압력을 보조가스의 봉입압력과 동일하다고 가정하였다. 따라서 보조가스의 봉입압력이 높을수록 작동중 발생기 내부의 압력이 증가하며, 발생기 내부압력이 증가하면 암모니아

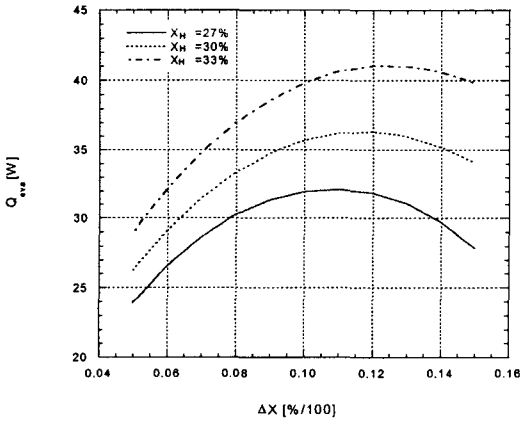

Fig. 5 Effects of concentration difference on refrigerating capacity.

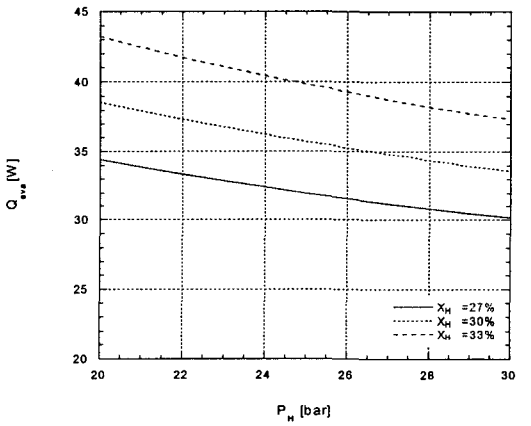

Fig. 6 Effects of auxiliary gas charging pressure on refrigerating capacity.

수용액의 비등점이 높아진다. 본 해석의 조건에서와 같이 발생기의 입열량이 200 W로 일정한 경우에는 암모니아 수용액의 비등점이 높아지면 냉매인 암모니아 증기의 발생량이 감소하게 되며, 결과적으로 확산형 흡수식 냉장고의 냉장능력은 감소하게 된다. 즉, 확산형 흡수식 냉장고는 시스템 내의 보조가스 봉입압력이 낮을수록 냉장능력이 향상된다. 그러나 보조가스의 봉입압력이 계속 낮아지면 응축기에서 암모니아 증기의 응축압력이 낮아지며, 응축기 내의 압력에 따른 응축온도가 외부 공기온도보다 낮아지면 응축이 이루어지지 않아 시스템이 작동하지 않게 된다.

3.4 기준조건에서의 해석결과

Table 2에 본 연구에서 설정한 기준조건에서의 확산형 흡수식 냉장고에 대한 사이클 해석결과를 나타내었다. Table 2에서 상태점(state point)은 Fig. 1에서 각지점의 상태점을 나타내며, 압력(pressure)은 시스템 내 암모니아의 분압을 의미한다.

Table 2 Results of cycle analysis at nominal condition

State point	Temp. [℃]	Pressure [bar]	Concentration [%]	Flowrate [g/s]
1	35.00	1.26	30.0	0.209
2	38.12	25.00	30.0	0.209
3	172.60	25.00	20.0	0.183
4	80.61	1.26	20.0	0.183
5	172.60	25.00	69.6	0.046
6	148.15	25.00	30.0	0.020
7	58.05	25.00	100.0	0.026
8	58.05	25.00	100.0	0.026
9	−28.87	1.26	100.0	0.026
10	−28.87	1.26	100.0	0.026
Heat Transfer Rate [W]		Absorber		151.76
		Desorber		200.00
		Condenser		26.25
		Evaporator		35.71
		Rectifier		46.88
		Solution H.X.		3.29
COP		0.179		

기준조건에서의 해석결과 발생기 입열량이 200 W일 경우, 증발기에서의 열전달량, 즉 냉장능력은 35.71 W, COP는 0.179임을 알 수 있었으며, 이는 Kim[4]의 해석결과인 발생기 입열량 203.4 W, 냉장능력 37.22 W 및 COP 0.183과 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 확산형 흡수식 냉장고에 대한 사이클 해석을 수행하였으며, 암모니아 수용액의 충진농도, 흡수기 입출구에서 암모니아 수용액의 농도차 및 보조가스의 봉입압력을 변수로 하여 사이클의 작동특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 암모니아 수용액의 충진농도가 증가할수록 정류기를 제외한 모든 열교환기에서의 열전달량은 증가한다. 한편 충진농도가 증가하면 증발기에서의 열전달량, 즉 냉장능력은 증가하는 반면, 증발온도의 상승으로 인하여 냉장고 고내온도가 상승하게 되는 단점이 있다.

(2) 흡수기 입출구에서 암모니아 수용액의 농도차가 증가함에 따라 냉장능력은 증가하다 임의의 값에서 최대능력을 나타낸 후, 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

(3) 발생기에서의 입열량이 일정한 경우, 시스템에 충진되는 보조가스의 압력이 낮을수록 냉장능력은 증가하며, 보조가스 봉입압력의 최저값은 응축기 내의 응축압력, 응축온도 및 냉장고 외부의 공기온도 등을 고려하여 결정하여야 한다.

참고문헌

1. Herold, K. E., Radermacher, R. and Klein, S. A., 1996, Absorption Chiller and Heat Pump, CRC Press, Inc.
2. Hideaki, O., 1993, Development of a portable absorption refrigerator, Refrigeration, Vol 68, No 783, pp. 49-53.
3. Narayankhedkar, K. G. and Maiya, M. P., 1985, Investigation on triple fluid vapour absorption refrigerator, Int. J. Refrig., Vol. 8, November, pp. 335-342.
4. Kim, K. J., Shi, Z., Chen, J. and Herold, K.

E., 1995, Hotel room air conditioner design based on the diffusion absorption cycle, ASHRAE Transactions: Symposia, CH-95-21-2, pp. 1290-1301.

5. Lee, H. K., Kim, S. C. and Lee, J. H., 2001, Operating characteristics of a bubble pump for diffusion-absorption refrigerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 878-887.