

공냉형 암모니아/물 GAX 흡수식 냉동 사이클의 수치 해석

A Numerical Simulation of Air-Cooled Ammonia/Water GAX Absorption Cooling Cycle

정 시 영*
S. Jeong

Key words : Absorption Cooling Cycle(흡수식 냉동 사이클), Ammonia/Water(암모니아/물), GAX (발생기/흡수기 열교환), Numerical Simulation(수치 해석)

Abstract

An air-cooled ammonia/water GAX(Generator-Absorber heat eXchange) absorption cooling cycle is proposed and its performance is numerically evaluated. It is shown that the performance of the system is greatly dependent on the quality of the refrigerant leaving the evaporator. For any refrigerant concentration in the investigated range(99.1~99.9% ammonia), the cycle COP(coefficiency of performance) reaches the highest value, when some amount(about 7%) of refrigerant evaporates in the refrigerant heat exchanger. Among temperature differences in various heat exchangers, the temperature difference between GAX-absorber and the GAX-generator shows the greatest effect on the system performance, whereas pressure losses cause no significant decrease in COP. The system COP increases almost linearly with increasing evaporator temperature, decreasing absorber temperature or decreasing condenser temperature. If both absorber and condenser temperature increase simultaneously, the decrease in the COP becomes larger.

기 호 설 명

로마 문자

COP : 성능 계수

h : 엔탈피 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량 유량 [kg/s]

p : 압력 [bar]

Q : 열전달량 [kW]

T : 온도 [°C]

W : 일 [kW]

v : 비체적 [m^3/kg]

x : 건도

그리스 문자

η : 효율

ξ : 농도

* 정회원, 서강대학교 기계공학과

하첨자

- ACA(Air Cooled Absorber) : 공냉흡수기
- ACC(Air Cooled Condenser) : 공냉응축기
- EVA(Evaporator) : 증발기
- GEN(Generator) : 발생기
- GAX(Generator-Absorber Heat Exchange) : 발생기/흡수기 열교환
- m : 평균
- REC(Rectifier) : 정류기
- RHX(Refrigerant Heat Exchanger):냉매열교환기
- SCA(Solution Cooled Absorber) : 용액냉각흡수기
- Spump(Solution Pump) : 용액 펌프

상첨자

- ' : 액체 상태
- " : 기체 상태

1. 서 론

최근 국내에서는 하절기의 전력 부족과 CFC 냉매에 대한 규제로 인하여 흡수식 냉동기의 이용이 적극 권장되고 있다. LiBr-물을 작동 유체로 사용하는 흡수식 냉동기는 대용량용으로 널리 보급되고 있으나 이를 수요가 집중되어 있는 공냉형의 소형 기기로 개발함에 있어서는 작동 유체의 특성상 많은 어려움이 따르고 있다. 암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 흡수식 냉동기는 작동 냉매인 암모니아/물의 우수한 열전달 특성과 유지, 관리의 용이함 때문에 공냉화, 소형화에 적합할 뿐만 아니라 GAX-사이클 흡수식 냉동기는 기존의 단순 암모니아/물 흡수식 냉동기보다 성능계수가 월등히 우수하므로 중소 용량의 냉난방기로서 크게 기대되고 있다. 또한 그동안 많은 논란이 있어 왔던 암모니아의 독성과 폭발성 문제도 여러 각도에서 해결책이 모색되고 있으므로 앞으로 암모니아를 사용하는 냉동기의 사용이 확대될 전망이다.¹⁾

GAX-사이클(Generator-Absorber heat exchange cycle)이란 흡수기에서 발생하는 고온의 열을 발생기의 가열에 사용하는 사이클로서 그 원리는 오래전부터 알려져 있었으나,^{2),3)} 최근에 들어서 실용화를 위한 연구가 미국을 중심으로 활발히

진행되고 있다. 하지만 국내에서는 암모니아/물 흡수식 냉동기에 대한 이해 부족과 연구 역량 부족으로 실질적인 연구가 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 GAX-사이클 흡수식 냉동기를 국내 기술로서 설계, 제작할 수 있는 발판을 만들고자 첫 단계로서 공냉형 GAX-사이클 흡수식 냉동기를 제안하고 이에 대한 수치 해석을 수행하였다.

암모니아/물을 냉매로 사용하는 GAX-사이클 흡수식 냉동기/열펌프는 국내에서 경험이 어느 정도 축적된 LiBr/물 흡수식 냉동수에 비하여 암모니아의 정류(rectification)과정이 필요하고 발생기와 흡수기 사이의 내부 열교환 과정이 있으므로 시스템의 해석이 복잡하다. 지금까지 암모니아 GAX-사이클 흡수식 냉동기에 대하여서는 몇몇의 수치 해석적 연구가 발표되었는데,^{4)~8)} 사이클의 구성이 공냉형인 본 연구와는 서로 상이하고, 사이클의 각 요소에서 온도 및 압력 손실 요소들의 영향에 대한 상세한 내용이 부족하기 때문에 본 연구에서는 이에 중점을 두어 연구를 수행하였다. 수치 해석에 필요한 암모니아/물의 물성치는 Ziegler 등의 식을 사용하였다.⁹⁾

2. 암모니아/물 흡수식 냉동 사이클의 구성과 작동 원리

2.1 기본 암모니아/물 흡수식 냉동 사이클

암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 흡수식 냉

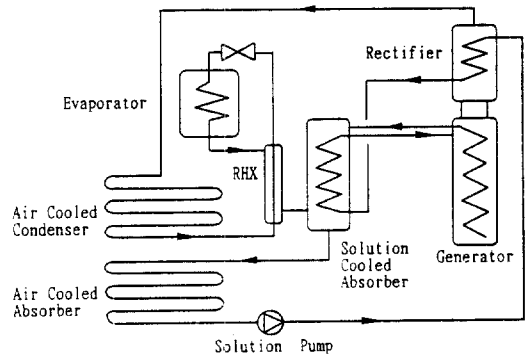


Fig.1 Schematic Diagram of a Simple Ammonia/Water Absorption Cooling Cycle

동 사이클은 여러 형태가 있으나 기본적으로는 Fig.1에 표시된 것처럼, LiBr/물을 사용하는 시스템과 마찬가지로 발생기, 응축기, 증발기 그리고 흡수기로 구성되며 여기에 발생기에서 발생되는 증기의 암모니아 농도를 증가시키기 위하여 정류기(rectifier)가 필요하며 시스템의 효율을 증가시키기 위하여 냉매 열교환기(refrigerant heat exchanger)가 추가된다.

발생기에서는 냉매인 암모니아를 분리시키는 과정이 일어나는데 발생기에 열이 가하여지면 비등점이 낮은 암모니아가 증발하여, 암모니아 농도가 감소한 용액(희용액)이 얻어진다. 이 용액은 흡수기로 보내지기 전에 발생기 열교환기(GHX : Generator Heat Exchanger)를 통과하면서 재생 과정의 일부를 담당한다. 이러한 과정(발생기 내부 열교환)을 통하여 재생 과정에 필요한 열량이 감소하므로 시스템의 효율은 그렇지 않은 경우에 비하여 향상된다. 발생기에서 발생된 증기는 암모니아 외에 물을 상당히 함유하고 있으므로 정류기에서 암모니아 농도를 보다 높혀 응축기로 보낸다. 공냉형 장치에서는 별도의 냉각수를 사용하지 않으므로 정류기는 흡수기에서 오는 온도가 낮은 농용액에 의해 냉각이 된다. 정류기를 통하여 농도가 99.8% 정도로 증가된 증기는 공냉형 응축기에서 응축이 되며 응축된 암모니아는 증발기에서 증발하며 냉동 효과를 얻게 된다. 증발된 암모니아 냉매는 냉매 열교환기를 거쳐 흡수기로 흡수된다. 흡수기는 용액냉각흡수기(solution cooled absorber)와 공냉흡수기(air cooled absorber)의 두 부분으로 구성된다. 용액냉각흡수기는 흡수기 교환기(AHX : Absorber Heat eXchanger)라고도 하는데 여기에서는 발생기 내부 열교환과 마찬가지로 흡수용액이 발생기로 들어가기 전에 자체 내에서 열교환이 이루어져 농액의 온도가 높아진다. 공냉흡수기에서는 흡수열은 대기에 방출된다. 이렇게 구성되는 암모니아 흡수식 냉동 사이클이 LiBr/물 사이클과 크게 다른 것은 발생기와 흡수기에서 자체 내 열교환을 통하여 효율을 향상시킬 수 있다는 것인데 이는 작동 유체인 암모니아/물이 농도 폭이 크게 때문에 온도 증첩의 원리를 이용하여 사이클을 좀더 가역적으로 구성한다는 의미를 지닌다. 물론 아주 간단한 사이클에서는 발생기 열교환기와

흡수기 열교환기를 제외하고도 사이클을 구성할 수 있지만 발생기 열교환기와 흡수기 열교환기는 거의 표준으로 확립된 기술이므로 이를 포함한 사이클을 기본 사이클로 생각하였다.

2.2 암모니아/물 GAX 흡수식 냉동 사이클의 구성

기본 사이클에서 살펴본 바와 같이 발생기와 흡수기에서 내부 열교환에 의해 시스템의 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. GAX 흡수식 사이클은 이러한 개념을 한단계 더 발전 시킨 것으로서 흡수기에서 발생하는 흡수열의 일부를 발생기로 들어가는 용액의 온도만을 높이는 것이 아니라 더욱 높은 온도로 가열하여 용액을 분리, 재생시키는 데 사용하는 사이클을 말한다. 암모니아/물의 온도-압력 선도($\ln p-1/T$ diagram)를 보면 암모니아 농도가 아주 낮은 점(5~10%)에서는 흡수열이 방출되는 온도가 130~140°C 근처까지 상승한다. 그러므로 이렇게 높은 온도에서 방출되는 흡수열은 발생기의 일부 재생 과정을 충분히 담당할 수 있다.

Fig.2에는 본 연구에서 제안한 공냉형 GAX-사이클의 구성이 나타나 있다. 본 연구의 GAX-사이클은 Fig.1의 기본 사이클에 발생기와 흡수기의 일부 부분이 확장된 것으로서 흡수기에 발생하는 흡수열은 순환 펌프에 의하여 순환되는 열전달 매체를 통하여 발생기 측으로 전달된다. GAX-흡수기(GAX-absorber)에서는 흡수기에서의 상부의 온도가 높고, GAX-발생기(GAX-generator)에서는 반대로 하부의 온도가 높으므로 열전달 매체는 Fig.2에 표시된 것처럼 유로가 구성된다. 본 연구에서 제안한 GAX-사이클에서는 용액냉각흡수기와 GAX-흡수기에서는 흡수용액은 유하 액막(falling film)을 이루며 아래로 흐르고 증발기에서 증발된 냉매는 용액과 반대방향으로 올라가는 대향류(counter flow)방식이고, 공냉형 흡수기에서는 냉매는 흡수 용액과 같은 방향으로 흐르게 된다. 시스템의 성능 측면에서는 공냉형 흡수기에서도 냉매 증기가 흡수 용액과 반대 방향으로 흐르는 것이 유리하지만 공냉형 흡수기의 구조상 흡수가 관내에서 이루어지기 때문에 대향류를 이루는 것이 어려우므로 공냉형 흡수기에서는 냉매 증기가 용액과 같은 방향으로 흐르며 흡수되는 것으로 생각하였

다. 이하의 내용에서 괄호 안의 번호는 Fig.2에서의 해당하는 점을 표시한다.

3. 사이클 해석 방법

많은 새로운 사이클과 마찬가지로 GAX 흡수식 냉동 사이클의 해석에 수치 시뮬레이션(numerical simulation)이 적절히 활용될 수 있다. 수치 시뮬레이션은 GAX-사이클과 같은 새로운 흡수식 사이클을 실제로 구성하고자 할 때 열역학적, 열전달적 측면에서 타당성을 검토하여 실물 제작에 필요한 정보를 얻을 수 있다. 시뮬레이션 프로그램(simulation program)은 흡수식 사이클을 구성하는 각각의 요소(component)에서 질량, 농도 및 열량의 평형 방정식을 기본으로 하여 구성되며 본 연구에서는 아래와 같은 가정을 사용하였다.

- 사이클 내의 각 점은 열역학적 평형상태에 있다.
- 흡수식 냉동기의 각 요소 및 배관에서 주변으로의 열손실은 무시하였다.
- 각 열교환기의 입출구에서 적절한 온도차를 두어 열교환 효율을 고려하였다.
- 배관에서의 압력 손실은 각 요소에서의 압력

손실에 포함시켜 고려하였다.

이러한 가정하에 각 요소에 대한 질량, 농도 및 열량의 평형 방정식을 세우면 다음과 같다.

공냉용축기

용축기 입구(1)는 포화 증기 상태이며 포화 증기의 농도는 99.1~99.9% 범위에 대하여 계산을 수행하였다. 용축기 출구(2) 온도는 냉각 공기 온도에 적절한 온도차를 더한 값으로 가정하였다. 용축기 출구에서의 상태는 포화액으로 가정하였다.

$$\dot{m}(1) = \dot{m}(2) \tag{1-1}$$

$$\xi(1) = \xi(2) \tag{1-2}$$

$$Q_{ACC} = \dot{m}(1)[h(1) - h(2)] \tag{1-3}$$

냉매열교환기

용축기에서 응축된 냉매는 냉매열교환기를 통하여 증발기로 들어간다. 냉매열교환기에서는 냉매액과 냉매증기의 온도 변화를 비교하여 (2)로부터 (3)으로의 냉매액의 온도 변화가 (5)로부터 (6)으로의 냉매 증기의 온도 변화보다 작으면 용축기의 출구(2) 온도에 적절한 온도차를 두어 용액 흡

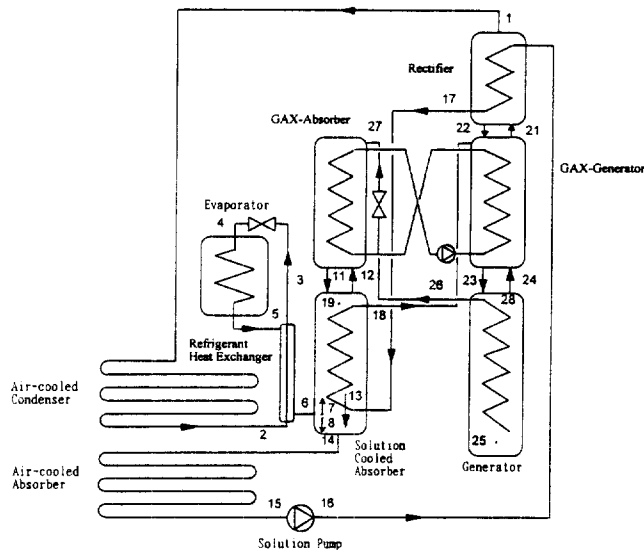


Fig.2 Schematic Diagram of an Ammonia/Water GAX Absorption Cooling Cycle

수기 입구(6) 온도를 결정한다. 반대의 경우에는, 이러한 경우는 냉매의 일부가 냉매열교환기에서 증발하기 때문에 (5)와 (6)의 온도차가 크지 않게 되는 경우인데, 증발기 출구(5)온도에 적절한 값을 더하여 (3)점의 온도를 결정하고 (6)점의 상태는 열평형식에 의하여 구한다.

$$\dot{m}(2) = \dot{m}(5) \quad (2-1)$$

$$\xi(2) = \xi(5) \quad (2-2)$$

$$Q_{RHX} = \dot{m}(2)[h(2) - h(3)] = \dot{m}(5)[h(6) - h(5)] \quad (2-3)$$

증발기

증발기에서는 냉매액이 팽창 장치를 통하여 (3)에서 (4)의 등엔탈피 과정으로 압력이 낮아지며 냉매가 증발한다. 증발기에서는 암모니아 농도가 충분히 높지 않은 경우 전체가 증발 하지 못하고 냉매열교환기에서 추가로 증발한다. 만약 냉매 열교환기에서도 완전히 증발되지 못하면 증발되지 못한 냉매액이 흡수기에 흘러 들어간다.

$$\dot{m}(3) = \dot{m}(5) \quad (3-1)$$

$$\xi(3) = \xi(5) \quad (3-2)$$

$$Q_{EVA} = \dot{m}(3)[h(5) - h(3)] \quad (3-3)$$

용액냉각흡수기

용액냉각흡수기에서는 용액은 상부(19)에서 하부(13)로 액막을 형성하며 떨어지고 증발기로부터 냉매열교환기를 통하여 들어오는 냉매 증기 중의 일부(7)가 하부에서 상부로 흐르며 흡수된다. 이러한 경우 흡수 용액은 (17)에서 (18)로 가열되는 농용액과 대향류로 열교환을 한다.

$$\dot{m}(7) + \dot{m}(11) = \dot{m}(12) + \dot{m}(13) \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \xi(7)\dot{m}(7) + \xi(11)\dot{m}(11) \\ = \xi(12)\dot{m}(12) + \xi(13)\dot{m}(13) \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} Q_{SCA} &= \dot{m}(17)[h(18) - h(17)] \\ &= h(7)\dot{m}(7) + h(11)\dot{m}(11) \\ &\quad - h(12)\dot{m}(12) + h(13)\dot{m}(13) \end{aligned} \quad (4-3)$$

공냉흡수기

공냉흡수기에서는 냉매 증기의 일부(8)가 용액냉각흡수기에서 흘러 내려온 흡수 용액(13)과 관내로 유입 되면서 흡수가 계속된다. 만약 냉매열교환기로부터 흡수기로 들어오는 냉매(6)가 완전히 증발하지 않은 경우에는 용액냉각흡수기가 공냉흡수기 보다 위에 위치하므로 액체는 공냉흡수기로 들어가는 것으로 생각하였다. 흡수기 출구에서는 냉각 공기의 온도에 적절한 온도차를 더한 온도의 포화액상태로 가정하였다.

$$\dot{m}(8) + \dot{m}(13) = \dot{m}(14) = \dot{m}(15) \quad (5-1)$$

$$\xi(8)\dot{m}(8) + \xi(13)\dot{m}(13) = \xi(14)\dot{m}(14) \quad (5-2)$$

$$Q_{ACA} = \dot{m}(14)[h(14) - h(15)] \quad (5-3)$$

용액 펌프

용액 펌프는 저압부에서 고압부로 용액을 이송시킨다. 용액 펌프는 단열 가열 과정을 가정하였다. 가압 과정 중에 용액의 비체적이 크게 변하지 않고 용액 펌프의 용량이 다른 요소에 비하여 상당히 작으므로 엔탈피를 계산하는데 적분을 수행하지 않고 상태점 (15)와 (16)의 비체적의 산술 평균에 압력차를 곱하여 계산하였다.

$$\dot{m}(15) = \dot{m}(16) \quad (6-1)$$

$$\xi(15) = \xi(16) \quad (6-2)$$

$$h(16) - h(15) = v_m[p(16) - p(15)] \quad (6-3)$$

$$W_{spump} = \dot{m}(15)[h(16) - h(15)] \quad (6-4)$$

정류기

정류기는 발생기에서 발생하는 냉매 증기의 농도를 높이는 역할을 하며 증발기에서 냉매가 주어진 조건에서 증발을 원활하게 하기 위해서는 필수적이

다. 본 연구에서는 정류기의 효율은 정류기로부터 되돌아오는 용액(22)이 정류기로 들어가는 증기(21)와 평형 상태에 있는 용액(18)의 농도에 가까운 정도를 나타내며 흡수식 냉동기에서는 보통 75~95%의 값을 갖는다.³⁾

$$\dot{m}(21) = \dot{m}(22) + \dot{m}(1) \quad (7-1)$$

$$\xi(21)\dot{m}(21) = \xi(22)\dot{m}(22) + \xi(1)\dot{m}(1) \quad (7-2)$$

$$\begin{aligned} Q_{REC} &= \dot{m}(16)[h(17) - h(16)] \\ &= h(21)\dot{m}(21) + h(11)\dot{m}(11) \\ &\quad - h(1)\dot{m}(1) - h(22)\dot{m}(22) \end{aligned} \quad (7-3)$$

$$\eta_{REC} = \frac{\xi(21) - \xi(22)}{\xi(21) - \xi'(18)} \quad (7-4)$$

위식에서 (18)점은 용액냉각흡수기에서 흡수열을 받아 가열되는 과정에서 이미 부분적으로 증발(재생)이 일어날 수도 있으므로 흐르는 용액의 전체 농도 $\xi(18)$ 을 기준으로 하지 않고 액체의 농도 $\xi'(18)$ 를 기준으로 하였다.

GAX-열교환기

GAX-열교환기는 GAX-흡수기와 GAX-발생기로 구성된다. GAX-흡수기와 GAX-발생기 사이는 열전달 매체가 순환함으로써 흡수기에서 발생한 열을 재생 과정에서 사용한다. GAX-흡수기의 상부에 회용액(27)이 분사되어 열교환기 면에 액막을 이루며 흘러내리고, 냉매 증기는 용액냉각흡수기와 마찬가지로 하부에서 상부로 올라가며 흡수된다. 이렇게 함으로서 흡수액의 평형 온도가 하부에서보다 상부에서 상당히 높게 되어 하부에서 상부로 흐르는 열전달 매체와 대향류로 열교환을 하는 효과를 얻게 된다.

GAX-발생기에서는 농용액(18)은 상부로 유입되어 액막을 이루며 흐르고 열전달 매체는 하부로 유입되므로 GAX-발생기 내에서는 하부의 온도가 상부보다 높게 되어 역시 대향류 형태의 열교환이 가능해진다.

$$\dot{m}(12) + \dot{m}(27) = \dot{m}(11) \quad (8-1)$$

$$\xi(12)\dot{m}(12) + \xi(27)\dot{m}(27) = \xi(11)\dot{m}(11) \quad (8-2)$$

$$\dot{m}(18) + \dot{m}(22) + \dot{m}(24) = \dot{m}(21) + \dot{m}(23) \quad (8-3)$$

$$\begin{aligned} \xi(18)\dot{m}(18) + \xi(22)\dot{m}(22) + \xi(24)\dot{m}(24) \\ = \xi(21)\dot{m}(21) + \xi(23)\dot{m}(23) \end{aligned} \quad (8-4)$$

$$\begin{aligned} Q_{GAX} &= h(12)\dot{m}(12) + h(27)\dot{m}(27) - h(11)\dot{m}(11) \\ &= h(21)\dot{m}(21) + h(23)\dot{m}(23) \\ &\quad - h(18)\dot{m}(18) - h(22)\dot{m}(22) \\ &\quad - h(24)\dot{m}(24) \end{aligned} \quad (8-5)$$

발생기

발생기는 연료의 연소열을 받아 GAX-발생기로부터 내려오는 용액을 가열하여 더욱 흡수 능력이 강한 회용액으로 만든다. 발생기 내에서는 용액은 셸(Shell)측에 차있는 상태로 하부로 흐르고, 발생된 증기는 상부로 흐른다. 이렇게 발생기 내에서도 농도 구배에 따른 온도의 분포가 있으므로 발생기에서 흘러나오는 용액은 용액냉각 흡수기(흡수기 열교환기)의 원리와 똑같이 내부 열교환이 이루어져 시스템의 성능이 향상된다. 즉, (25)에서 최고 온도로 가열된 용액은 자체 내를 통과하여 나오면서 (26)점으로 냉각되며 셸 측에 흐르는 용액을 가열시킨다.

$$\dot{m}(23) = \dot{m}(24) + \dot{m}(26) \quad (9-1)$$

$$\xi(23)\dot{m}(23) = \xi(24)\dot{m}(24) + \xi(26)\dot{m}(26) \quad (9-2)$$

$$Q_{GEN} = h(24)\dot{m}(24) + h(26)\dot{m}(26) - h(23)\dot{m}(23) \quad (9-3)$$

위에 서술한 각 요소에서의 질량, 농도 및 에너지 평형식을 시스템 전체적으로 맞추기 위하여 본 연구에서 사용한 계산 유동도(flow chart)가 Fig. 3에 표시되어 있으며 개략적인 계산 순서는 다음과

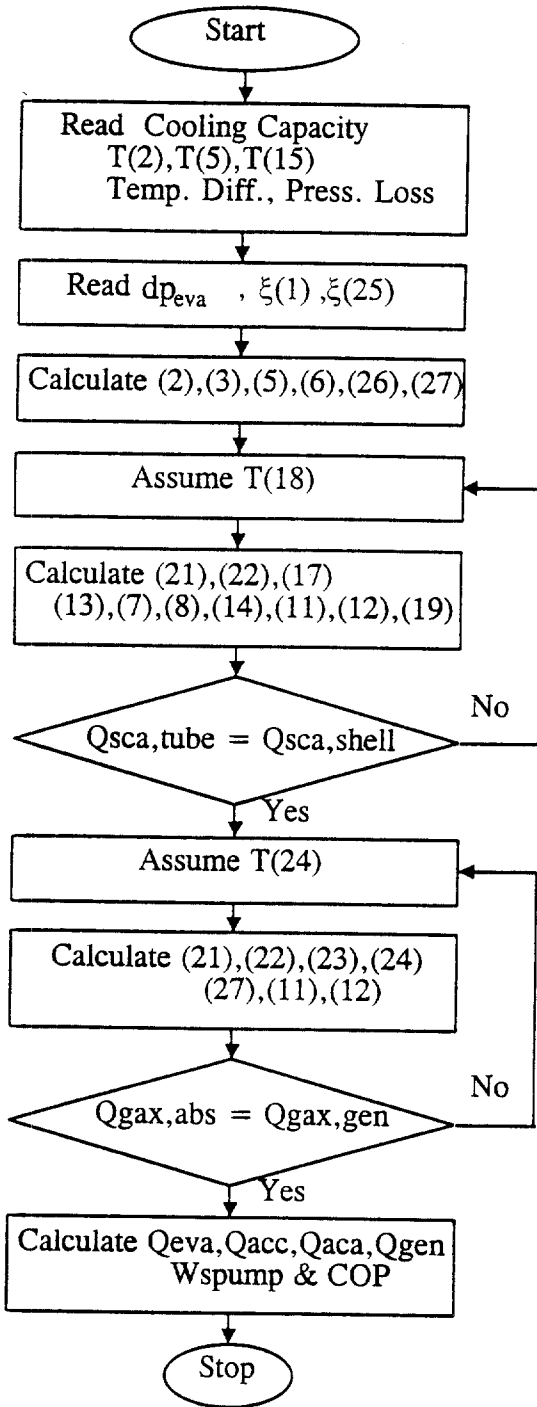


Fig.3 Flow Chart of Simulation Program

같다.

우선 설계하고자 하는 냉동기의 용량과 공냉흡수기 출구 온도(15), 공냉용축기의 출구 온도(2), 증발기 출구 온도(5)를 읽어 들인다. 또한 각 요소에서 열전달 면적이 유한함으로 인하여 발생하는 온도차와 각 요소에서의 압력 손실의 적절한 값을 입력한다. (1)에서의 냉매의 농도, (25)에서의 회용액의 농도, 그리고 증발기에서의 압력은 적절한 범위에서 자유롭게 가정하여 시뮬레이션을 수행함으로써 이들의 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 살펴 볼 수 있다. 증발기에서의 압력을 어떻게 결정하느냐에 따라 증발기 출구(5)에서 냉매의 건도가 결정되는데 증발기에서의 압력은 증발기 출구의 포화 용액 압력에서 일정한 압력차(dp_{eva})를 감하여 정하였고 시뮬레이션에서 이 압력차(dp_{eva})의 영향을 살펴 보았다. 냉매 열교환기의 각 상태점(2, 3, 5, 6)은 출입구에서 적절한 온도차를 가정하고 열량 평형을 생각하여 쉽게 계산된다. 발생기에서 내부 열교환을 거치고 나가는 회용액(26)은 GAX-흡수기에서의 압력(27)에서 포화 용액 온도까지 냉각되는 것으로 가정하였다. (27)의 상태는 (26)에서 등엔탈피과정으로 감압되는 것을 가정하면 쉽게 결정된다. 다음 단계의 계산은 용액냉각흡수기를 거쳐 나가는 농용액(18)의 온도를 적절히 가정함으로써 정류기 부분의 상태점(21, 22, 17), 용액냉각흡수기 부분의 상태점(13, 7, 8, 14, 11, 12, 19)을 결정한다. 이렇게 상태점들을 결정한 후, 용액냉각흡수기에서 셸 부분과 튜브 부분의 열량을 비교하는 반복 계산(iteration)을 수행하여 임의로 가정하였던(18)점의 온도를 정할 수 있다.

마지막 단계는 GAX-발생기(21, 22, 23, 24)에서의 열교환량이 GAX-흡수기(27, 11, 12)에서의 열교환량과 같아야 한다는 조건에서 반복 계산을 통하여 (28)과 (24)의 상태를 결정하는 과정이다. 이 과정을 끝으로 모든 상태점이 결정되므로 이제 주어진 용량에 맞게 적절한 값을 곱하여 모든 점에서의 유량과 열전달량을 결정할 수 있다.

냉동기의 성능 계수는 냉동 능력(Q_{EVA})를 발생기의 가열에 필요한 열량(Q_{GEN})으로 나눈 값으로 정의된다.

$$COP = \frac{Q_{EVA}}{Q_{GEN}} \quad (10)$$

Table 1 Input Data for Calculating Design Condition

* COMMENT : original input data				
* capacity(kW), 1RT=3.517kW 17.585				
* condenser temp.(K)	refr. conc.	evaporator temp.(K)	dpeva(bar)	
318.15	0.998	276.15	0.130	
* absorber temp.(K)	weak sol. conc			
318.15	0.010			
* rectification efficiency				
0.800				
* temperature losses(K)				
* dt(02~06)	dt(13~17)	dt(18~19)	dt(11~21)	dt(23~27)
5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
* pressure losses(bar)				
* dp(01~02)	dp(14~15)	dp(11~27)	dp(21~23)	
0.100	0.100	0.010	0.010	
* dp(25~28)	dp(25~26)	dp(07~19)	dp(17~18)	
0.010	0.020	0.010	0.020	
* dp(01~21)	dp(16~17)	dp(05~06)	dp(02~03)	
0.010	0.020	0.010	0.020	

Table 1과 Table 2에는 한 예로서 냉동 능력 5RT(17.6kW)인 GAX 흡수식 냉동기의 기준 설계 조건(희용액 농도 : 1%, 냉매 농도 : 99.8%, $dp_{eva} : 0.13\text{bar}$, 온도차와 압력 손실 고려)의 입력 데이터와 계산 결과를 표시하였다.

4. 사이클 시뮬레이션의 결과 및 토론

이상에서 설명한 방법으로 시뮬레이션 프로그램을 작성하고 다양한 경우에 대하여 계산을 실시하였다. 계산은 우선 내부에서의 온도차와 압력 손실이 없는 경우에 대하여 실시하고 이어 적절한 온도차와 압력 손실을 가정하여 실시하였다.

4.1 냉매 농도와 증발기에서의 압력차의 영향

기존의 흡수식 냉동기에서는 냉매의 암모니아 농도는 정류 과정을 통하여 약 99.8% 정도로 유지하는 것이 일반적이다.³⁾ 본 연구에서는 냉매의 농도와 증발기에서의 압력차(dp_{eva})을 변화시키며 최적의 운전 조건을 찾아보았다. Fig.4는, 각각의 냉

매 농도에 대하여 최적의 dp_{eva} 가 존재하는 것을 보여 준다. dp_{eva} 가 최적치보다 작아지면 COP는 급격히 감소하는데 이는 이 경우에 증발기에서 증발하지 못하는 냉매가 냉매열교환기에서도 증발하지 못하고 흡수기로 들어가기 때문이다. 냉매 농도 99.8%의 경우에 성능의 최고치는 $dp_{eva}=0.11\text{bar}$ 에서 나타나는데 이 압력에서 (5)의 냉매는 93% 가량이 증발된 상태이고 (6)에서는 완전히 증발된 상태이다. 이로부터 증발기 출구(5)에서 냉매가 완전히 증발하지 않고 일부의 냉매(약 7% 정도)가 냉매 열교환기에서 증발하는 점이 성능계수를 가장 높게하는 최적 상태라는 것을 알 수 있으며, 각 냉매 농도에서 나타나는 성능계수의 최고치는 거의 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. dp_{eva} 가 최적치보다 증가하면 증발기에서 증발하는 양은 따라서 증가하나 이 경우 냉매 열교환기가 충분히 역할을 하지 못하고 흡수기에서의 용액 농도가 감소하여 전체적으로 시스템의 성능은 감소하게 된다. 이러한 경향은 암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 시스템의 특징으로 GAX-사이클이 아닌 기본

Table 2 Output Data for Design Condition

point	t(°C)	p(bar)	conc.	h(kJ/kg)	quality	m(g/sec)
1	59.73	17.88	0.998	1688.0	1.000	15.32
2	45.00	17.78	0.998	559.3	0.000	15.32
3	8.45	17.77	0.998	382.8	0.000	15.32
5	3.00	4.65	0.998	1530.9	0.935	15.32
6	40.00	4.63	0.998	1707.5	1.000	15.32
7	40.00	4.63	0.998	1707.5	1.000	6.99
8	40.00	4.63	0.998	1707.5	1.000	8.33
11	115.69	4.62	0.110	454.0	0.000	22.91
12	110.69	4.62	0.706	2103.6	1.000	3.30
13	79.01	4.63	0.270	256.0	0.000	26.60
14	74.24	4.63	0.443	602.1	0.231	34.93
15	45.00	4.53	0.443	112.3	0.000	34.93
16	45.13	17.93	0.443	113.9	0.000	34.93
17	74.01	17.91	0.443	246.7	0.000	34.93
18	105.69	17.89	0.443	492.6	0.073	34.93
19	110.69	4.62	0.130	426.	0.000	0.00
21	105.69	17.89	0.956	1847.9	1.000	16.75
22	85.20	17.89	0.513	324.9	0.000	1.44
23	140.38	17.90	0.245	540.4	0.000	29.20
24	154.54	17.90	0.725	2143.0	1.000	9.59
25	203.81	17.91	0.010	868.9	0.000	19.61
26	145.37	17.89	0.010	611.5	0.000	19.61
27	145.38	4.61	0.010	611.5	0.000	19.61
28	154.54	17.90	0.187	612.9	0.000	0.00

* heat and work transfer rate(kW)

qsca	qgax	qrhx	qrec	qghx
8.588	8.525	2.704	4.638	5.049
qeva	qgen	wspump	qacc	qaca
17.585	16.755	0.056	17.286	17.110
input	output	cop		
34.396	34.396	1.0495		

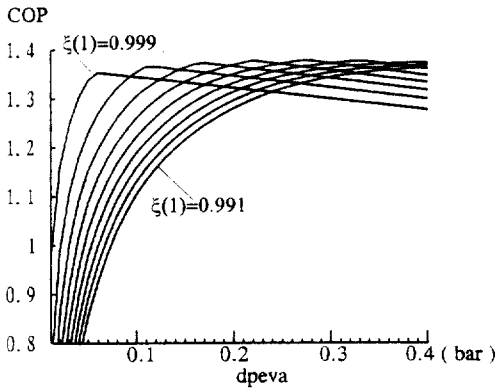


Fig.4 Effect of Refrigerant Concentration and Evaporation Pressure on the System Performance(without Temperature & Pressure Losses)

사이클에서도 비슷한 경향을 보인다.¹⁰⁾ 실제 기기에서 dp_{eva} 는 흡수기에서의 용액 농도에 의하여 주로 영향을 받는데, Fig.4에서 보듯이 냉매의 순도가 떨어지면 흡수기에서의 용액 농도 변화에 시스템의 성능이 크게 좌우되므로 넓은 증발 압력 범위에서 안정된 운전을 보장하기 위해서는 기존의 흡수식 냉동기의 경우처럼 냉매의 농도는 99.8% 이상으로 유지하는 것이 바람직하다.

4.2 회용액 농도의 영향

GAX-사이클에서는 온도 중첩 구역을 늘이려면 회용액(25)의 농도를 가능하면 낮게 유지하는 것이 유리하다. 회용액의 농도의 정량적 영향을 알아보기 위하여 회용액의 농도를 1~5%로 변화시키며 성능의 변호를 계산하였다. Fig.5에는 예상한 것처럼 회용액의 농도가 낮을 수록 COP가 높아지는 결과가 나타나 있다. 이 결과에 따라 이하의 계산에서는 회용액의 농도는 1%로 고정하였다.

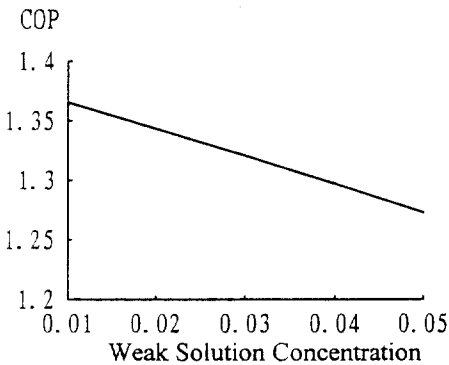


Fig.5 Effect of Weak Solution Concentration on the System Performance

4.3 온도차 및 압력 손실의 영향

사이클을 구성하는 각 열교환기에서 열교환이 이루어지려면 열교환이 이루어지는 매체간에 필요한 온도차가 존재하여야 하고, 각 요소에서 작동 유체가 이동하는 경우 압력 손실이 수반된다. 이러한 온도차와 압력 손실은 사이클의 성능을 감소시키는데 그 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 각 요소에서의 온도차와 압력차를 두어 계산을 수행하였다. 온도차에 의한 손실에는 증발기와 냉수 간의 온도차, 공냉흡수기와 냉각 공기와의 온도차, 공냉응축기와 냉각 공기간의 온도차에 의한 손실과 발생기에서의 손실이 큰 비중을 차지하는데 이는 곧 이어 다루고 여기에서는 GAX-흡수기 등과 같은 시스템 내부에서의 온도차와 압력 손실이 시스템의 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 정류기의 성능은 80%로 하였으며, 각 부분의 온도차는 문헌을 참조하고 비교를 손쉽게 하기 위하여 모두 5K로 하였고, 압력 손실도 문헌을 참고하여 값을 결정하였다.³⁾

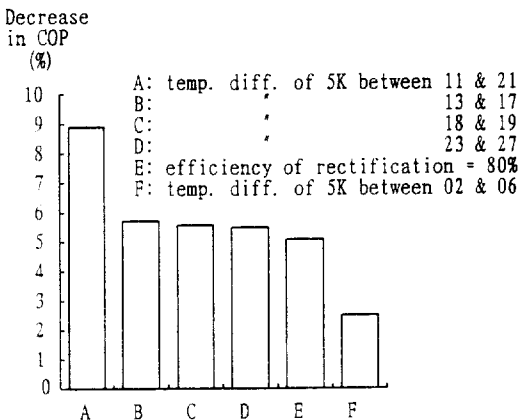


Fig.6 Effect of Temperature Losses on the System Performance

Fig.6은 온도차 및 압력 손실이 없는 경우를 기준으로 특정 부분에서의 손실이 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 보여 준다. 정류기의 성능을 100%에서 80%로 감소시키는 것은 정류기에서의 열

교환 효율을 고려하여 유한한 온도차를 주는 것과 동일한 의미인데, 시스템의 성능은 1.366에서 1.296으로 감소하여 약 5.1%의 성능 감소를 보였다. 온도차의 경우는 GAX-흡수기의 저온부(11)와 GAX-발생기의 저온부(21)의 차이를 5K로 한 경우 성능 감소가 8.9%로 다른 부분에서의 같은 온도차보다 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 각 부분에서의 압력 손실은 시스템의 성능에 미치는 정도가 최대 0.4% 정도로 미미하였다.

Fig.7은 Fig.6에서 별도로 고려한 각각의 손실 요소들을 동시에 고려하여 성능을 파악한 것으로 이를 Fig.4와 비교하면 성능 곡선의 경향은 서로 유사하며 온도차와 압력차에 의한 손실로 인하여 냉매 농도 99.8%인 경우 시스템의 최적 COP가 1.366에서 1.050으로 약 23% 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 손실 요소를 고려한 사이클을 기준 설계 조건으로 선정하였다.(Table 1, 2 참조)

4.4 증발기, 공냉흡수기, 공냉응축기 온도의 영향

증발기, 공냉흡수기, 공냉응축기 온도는 냉수와 냉각 공기의 온도와 각 열교환기의 성능에 따라 영향을 받게 된다. Fig.8은 이들의 온도가 기준 설계 조건(증발기 출구 온도(5)=3°C, 공냉흡수기 출구

온도(15)=45°C, 공냉응축기 출구 온도(2)=45°C)에서 벗어나는 경우에 COP의 변화를 보여 준다. 증발기의 온도는 높을수록, 공냉흡수기와 공냉응축기의 온도는 낮을수록 시스템의 성능계수가 증가하며, 공냉흡수기와 공냉응축기의 온도가 동시에 증가하는 경우, 예를 들면, 냉각 공기의 온도가 높아지는 경우에는 성능의 저하폭이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 각 온도의 변화는 계산 범위 내에서는 성능에 선형적으로 영향을 미쳤으며 증발기에서의 온도 변화가 흡수기와 응축기에서의 같은 온도 변화보다 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.5 발생기 효율의 영향

본 연구 대상 시스템에서는 연료(주로 가스)를 연소하여 그 연소열이 발생기를 가열하게 되는데 발생기에 소요되는 연료량은 발생기에 필요한 열량을 연소 효율로 나누어 결정되므로 고효율 버너를 사용하여 연소 효율을 높이는 것이 실제 시스템의 성능 향상에 매우 중요한 요소이다. 연소에 관련된 효율은 본 연구에서는 다루지 않았으며, 그러므로 이상에서의 COP라 함은 냉동 능력(Q_{EVA})을 발생기에 가해진 열량(Q_{GEN})으로 나눈 값임을 다시 한번 언급한다.

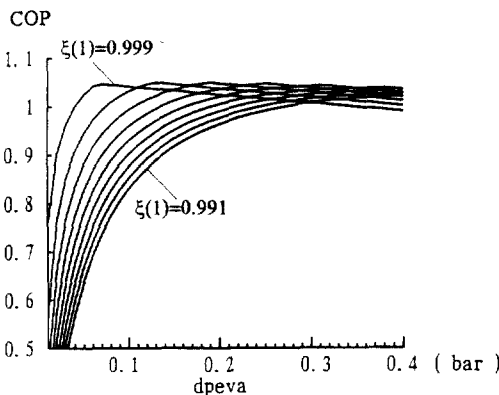


Fig.7 Effect of Refrigerant Concentration and Evaporation Pressure on the System Performance(with Temperature & Pressure Losses)

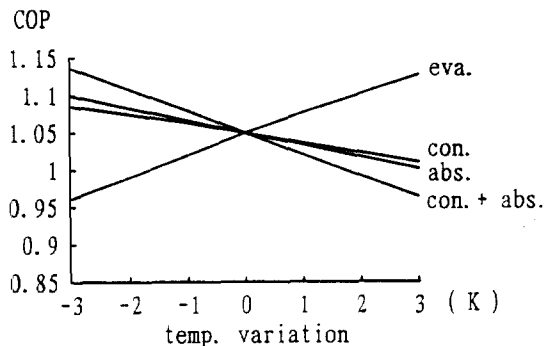


Fig.8 Effect of Variation of Evaporator, Absorber, and Condenser Outlet Temperature on the System Performance

5. 결 론

후 기

본 연구에서는 하절기의 전력 수급 불균형 해소의 한 방안이 될 수 있는 고효율의 공냉형 암모니아/물 GAX 흡수식 냉동 사이클을 제안하고 기본 설계를 위한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 공냉형 암모니아/물 GAX 흡수식 냉동 사이클은 정류기가 냉각수 대신 용액으로 냉각이 되며 흡수기가 대향류로 구성되지 않는다는 점에서 수냉형 사이클과 차이가 난다. 또한 공기의 열전달 성능이 물에 비하여 좋지 않으므로 응축기와 흡수기의 온도가 수냉형에 비하여 상승한다. 수치 시뮬레이션의 결과를 보면 공냉형 시스템의 냉방 COP는 온도 손실과 압력 손실을 고려한 경우에 약 1.05로서 지금까지 연구된 수냉형 사이클의 성능과 크게 차이가 나지는 않으며,^{3),4)} 다른 중요한 계산 결과는 다음과 같다.

- 주어진 냉매 농도(99.1~99.9%)에 대하여 증발기 출구에서 냉매가 완전히 증발하지 않고 일부의 냉매(약 7% 정도)가 냉매 열교환기에서 증발하는 것이 시스템의 COP를 가장 높게 하며 각 냉매 농도에서 나타나는 COP의 최고치는 거의 비슷한 값을 갖는다. 그러나 넓은 운전 범위에서 안정된 성능을 확보하기 위해서는 냉매 농도는 가능하면 높게(99.8% 이상) 유지하는 것이 바람직하다.
- 회용액의 농도가 낮을수록 COP는 높아지므로 회용액 농도를 낮게(1% 정도) 유지하는 것이 바람직하다.
- 각 부분에서 열전달에 필요한 온도차가 미치는 영향 중에서, GAX-흡수기 저온부와 GAX-발생기 저온부 사이의 온도차가 시스템의 성능에 가장 큰 영향을 미치므로 열전달 성능을 증가시키는 경우 GAX-열교환기 부분을 개선하는 것이 가장 효과적일 것이다.
- 증발기 출구 온도는 높을수록, 공냉흡수기와 공냉응축기 출구 온도는 낮을수록 시스템의 성능계수가 증가하며, 각 온도의 변화는 계산 범위 내에서는 성능에 선형적으로 영향을 미쳤다.

본 연구는 산학 협동 재단과 (주) 경원세기의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 감사하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Ayub, Z., 1995, "Enhanced Surface Heat Exchangers with Reduced Ammonia Charge", ASHRAE '95 Seminar
2. Altenkirch, E., 1954, "Absorptionskaeltemaschinen" VEB-Verlag, pp. 60~63
3. Niebergall, W., 1959, "Sorptionskaeltemaschinen", Springer-Verlag, pp. 15~16, pp. 197~217
4. Herold, K. E., He, X., Erickson, D. C. and Rane, M. V., 1991, "The Branched GAX Absorption Heat Pump Cycle", Absorption Heat Pump Conference '91. pp. 127~132
5. Rane, M. V. and Erickson, D. C., 1994, "Advanced Absorption Cycle : Vapor Exchange GAX", Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference '94, pp. 25~32
6. Kang, Y. T. and Christensen, N., 1994, "Development of a Counter-Current Model for a Vertical Fluted Tube GAX-Absorber", Proceedings of the International Absorption Heat Pump conference '94. pp. 7~14
7. Wilkinson, W. H., Hanna, W. T., Phillips, D. B. and Saunders, J. H., "Pinch Point Analysis : An Aid to Understanding the GAX Absorption Cycle", ASHRAE '95 Seminar
8. Grossman, G., Devault, R. C. and Creswick, F. A., "Simulation and Performance Analysis of an Ammonia-Water Absorption Heat Pump Based on the Generator-Absorber Heat Exchange(GAX) Cycle", ASHRAE '95 Seminar
9. Ziegler, B., 1982, "Waermetransformation

- durch einstufige Sorptionsprozesse mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser”, Ph. D. Thesis, Tech. Univ. of Zurich, pp. 9~36
10. Jeong, S., Lee, C. S. and Kang, S. W., 1993, “Dynamic Simulation on an Ammonia/Water Absorption Chiller of Small Capacity”, Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Volume 1, pp. 490~495