

하이브리드 GAX 사이클 해석 : 성능향상 및 저온획득 응용

강 용 태[†], 조 현 철, 홍 희 기
 경희대학교 기계산업시스템공학부, 산학협력기술연구원

Hybrid GAX Cycle : Performance Improvement and Low Temperature Applications

Yong Tae Kang[†], Hyun Churl Cho, Hi Ki Hong
 School of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung Hee University,
 Kiheung, Yong-in, Kyung-gi, 449-701, Korea

(Received March 23, 2001; revision received July 18, 2001)

ABSTRACT: The objectives of this paper are to develop an advanced GAX cycle named HGAX (Hybrid Generator Absorber heat eXchange) cycle, and to study the effect of key parameters on the cycle performance and the evaporating temperature. Two different HGAX cycles are developed—Type A (Performance improvement) and Type B (Low temperature applications). A compressor is placed between the evaporator and the absorber, and the evaporator pressure and the absorber pressure are controlled according to its application purpose. It was found that the COP could be improved by 24% compared with the conventional GAX cycle and the evaporating temperature as low as -80°C could be obtained from the HGAX cycle.

Key words: Hybrid GAX(하이브리드 GAX), Performance improvement(성능향상), Low temperature applications(저온응용), Ammonia-water(암모니아-물)

기 호 설 명

COP : 성적계수
 GAXA : GAX 흡수기
 GAXD : GAX 발생기
 GFD : 가스구동발생기
 SCA : 용액냉각흡수기
 SHD : 용액가열발생기
 HCA : 수냉식흡수기
 P : 압력 [kPa]
 Q : 열전달량 [kW]
 T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

x : 용액농도 [%]
 UA : 총열관류율 [kW/K]
 W : 압축일에 의한 열전달량 [kW]

하첨자

a : 흡수기
 $comp$: 압축기
 cd : 응축기
 d : 발생기
 e : 증발기

1. 서 론

가스구동 흡수식 시스템은 인류와 환경에 여러 가지 유익을 가져다 준다. 첫째, 시스템의 고효율

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

에 따른 매력적인 경제성을 제공하고, 둘째 천연 가스의 사용으로 인하여 여름철 최대 전력수요 (peak electric demand)를 완화하고, 셋째 이산화탄소(CO₂)의 발생을 감소시킴으로써 지구온난화 현상을 완화한다. 실제로 가스구동 흡수식 시스템으로부터의 CO₂ 발생량은 증기보일러를 사용하는 전기구동 냉동기의 85% 수준인 것으로 알려져 있다. 넷째로 암모니아 및 물과 같은 환경친화적인 냉매들을 사용하므로 오존층을 파괴하는 Chlorofluorocarbon(CFC) 및 Hydrochlorofluorocarbon(HCFC)계 냉매들을 대체할 수 있는 이점이 있다. 1992년 몬트리얼 협정에 의하여 CFC 및 HCFC의 사용이 각각 1997년 및 2020년부터 전면 금지된다. CFC 및 HCFC의 차세대 냉매로 개발되어진 HFC도 지구온난화를 일으키는 원인 중의 하나로 밝혀짐에 따라서 1997년 교토 의정서에 의해서 사용금지가 국제적으로 합의되었다. 이들을 대체하기 위하여 여러 연구들이 진행되어온 바, 환경친화적 자연냉매를 사용하는 열구동 흡수식 시스템이 가정용과 소형 상업용(암모니아-물 시스템) 및 대형 산업용(리튬브로마이드-물 시스템)에서 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 암모니아-물을 냉매로 하여 한 장치로부터 필요에 따라 성능향상모드 또는 저온회득모드로 운전할 수 있는 차세대 하이브리드 GAX 사이클을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 차세대 GAX 사이클

고성능 GAX 사이클은 기본적으로 1단(single stage) 시스템의 형상을 가지고 있지만 흡수기와 발생기간의 온도중첩(temperature overlap) 원리에 의하여 그 어느 단효용(single effect) 사이클보다 높은 COP(Coefficient Of Performance)를 제공한다. 암모니아-물 흡수식 사이클에서 발생기 출구의 온도가 약 200℃ 이상에서는 흡수기와 발생기간에 부분적으로 온도가 중첩된다. 이러한 온도중첩이 GAX 사이클의 기본원리이며, 부분적으로 중첩된 온도구간 내에서 흡수기로부터 발생기로 내부열이 전달되어 시스템의 성능을 향상시키는 결과를 초래한다. 이 온도중첩의 원리는 같은 흡수식인 H₂O/LiBr 시스템에서는 얻지 못하는 암모니아-물 시스템만의 특성이다.

현재까지 표준 GAX 사이클에 대하여 많은 연

구가 되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 차세대 GAX 사이클로 -50℃까지의 증발온도를 얻을 수 있는 저온용 GAX 사이클(LGAX⁽⁴⁾), 폐열을 이용하는 폐열구동 GAX 사이클(WGAX⁽⁵⁾), 그리고 온돌에의 응용을 위한 GAX 사이클(PGAX⁽⁶⁾), 흡수기와 발생기간의 열전달량 불일치의 문제를 해결하는 분지형 GAX 사이클(BGAX⁽⁷⁾), 중간압력에서 기류교환을 통하여 내부 열회수 효과를 얻는 GAX 사이클(VGAX⁽⁸⁾) 등이 연구개발되고 있다. 먼저 LGAX 사이클은 -50℃까지의 저온의 증발온도를 얻기 위한 GAX 사이클로 용액의 암모니아 농도가 5, 10, 25, 47 및 60%로 여러 분지를 형성하며 온도중첩에 의한 GAX 효과를 통해서 저온에서도 1.0 이상의 COP를 얻을 수 있다. PGAX 사이클은 65℃ 이상의 응축기 온수출구온도를 얻을 수 있는 사이클로서, 흡수기에서 얻은 온수는 공간난방으로(약 45℃의 온수), 응축기로부터 얻은 온수는 패널난방(또는 온돌난방)으로 사용하도록 할 수 있는 다목적 사이클이다. 즉 하나의 하드웨어로부터 냉방, 공간난방 및 온돌난방에까지 응용할 수 있는 GAX 사이클로서, 특히 한국의 가정용 냉난방 시스템에 적합한 사이클이다. 기존의 표준 GAX 사이클에서는 200℃ 이상에서 열전달 표면이 기체에 장시간 노출되면 부식이 생기게 되는데, WGAX 사이클은 이러한 고온에서의 부식문제를 해결하기 위하여, 여러 위치에서 배열(waste heat)을 사용하여 종래의 GAX 사이클과 동일한 COP를 유지하며 사이클 내의 최고온도를 가능한 내리도록(약 172℃까지 내림) 개발된 배열이용 GAX 사이클이다.

HGAX 사이클은 흡수식 사이클에 압축기를 추가 장착한 GAX 사이클로서 흡수식 사이클과 압축식 사이클의 장점을 취한 새로운 사이클이다. 압축기 위치에 따라 E/A hybrid cycle과 G/C hybrid cycle이 있다. E/A hybrid cycle은 증발기와 흡수기 사이에 압축기를 장착한 사이클이고, G/C hybrid cycle은 발생기와 응축기 사이에 압축기를 장착한 사이클이다. 현재 HGAX 사이클은 그 가능성에 대한 사이클 모델이 제안된 상태⁽⁴⁾이며 아직 구체적으로 실험 또는 모사실험을 통하여 사이클 성능을 해석한 사례는 없다.

3. 사이클 모델링

현재 흡수식 사이클의 대표적인 프로그램으로

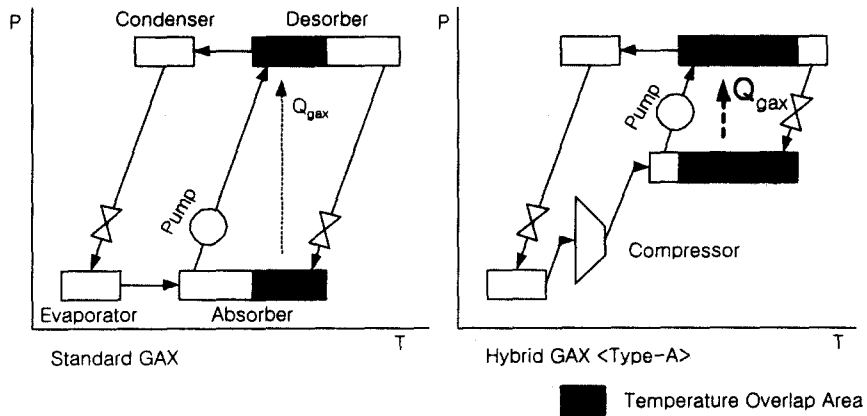


Fig. 1 Hybrid GAX cycle (Type A).

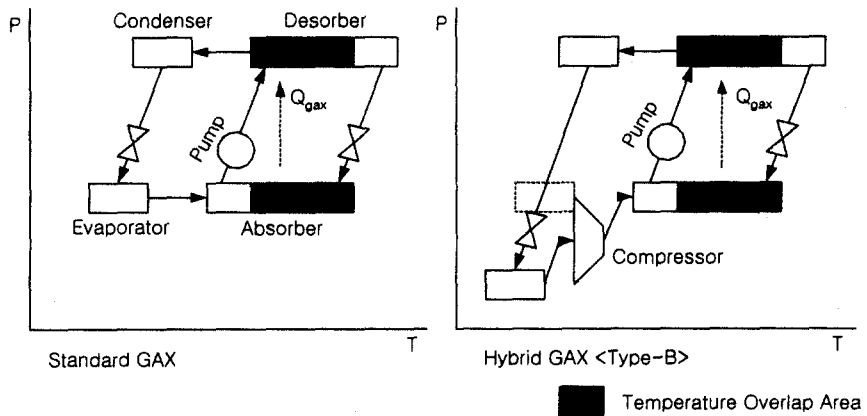


Fig. 2 Hybrid GAX cycle (Type B).

는 ABSIM(ABsorption SIMulation)⁽⁹⁾과 EES (Engineering Equation Solver)가 있다. ABSIM은 모듈타입의 흡수식 전용 모사프로그램으로 흡수식 시스템을 구성하는 12가지의 열교환기 서브루틴이 포함되어 있고, 물-리튬브로마이드 및 암모니아-물을 포함하여 13가지의 흡수용액을 사용할 수 있도록 각각의 열물성치 서브루틴들이 내장되어 있다. 가장 최근에 개발된 ABSIMW 5.06에는 압축기가 첨가되었고, 자동적으로 감도분석(parametric analysis)이 가능하도록 하는 기능이 첨가되었다. ABSIM은 내장되어 있는 구성요소들을 이용하여 사이클을 구성하고 PT_x 선도를 기본으로 각 상태점의 특성과 초기값들을 설정하면 구성요소 단위별로 수치해석을 실시하면서 전체 사이클을 해석한다. 본 연구에서는 ABSIM을 이

용하여 HGAX 사이클의 두 경우, 즉 Type A(성능향상)와 Type B(저온획득)에 대하여 다루었다. 먼저 Type A는 Fig. 1에 나타나 있듯이 압축기를 증발기와 흡수기 사이에 두고 표준 GAX 사이클과 동일한 증발압력에 대하여 흡수기의 압력을 상승시킨 사이클이다. 흡수기의 압력이 상승함에 따라서 흡수기와 증발기 사이의 온도중첩에 의한 내부 열회수량이 증가하고 따라서 주어진 증발온도에 대하여 성능이 향상되는 사이클이다. Type B는 Fig. 2에 나타나 있듯이 표준 GAX 사이클과 동일한 흡수기 압력에 대하여 증발압력을 하강시켜서 보다 저온의 증발온도를 얻는 사이클이다.

Fig. 3에 하이브리드 GAX 사이클의 시스템 개략도가 나타나 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이

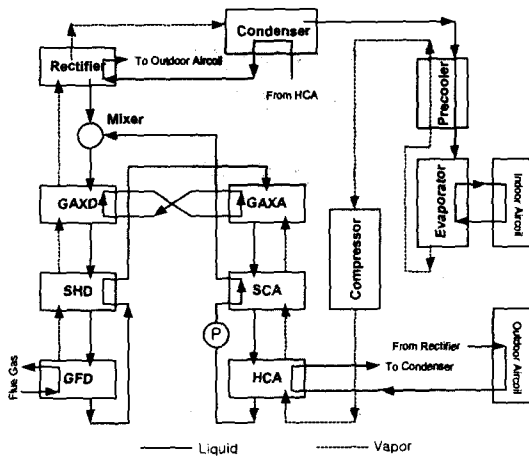


Fig. 3 Schematic diagram of HGAX cycle.

암모니아-물의 HGAX 사이클은 수냉흡수기(Hydrionic Cooled Absorber, HCA), 용액냉각 흡수기(Solution Cooled Absorber, SCA), GAX 흡수기(GAX Absorber, GAXA), 가스구동 발생기(Gas Fired Desorber, GFD), 용액가열 발생기(Solution Heated Desorber, SHD), GAX 발생기(GAX Desorber, GAXD), 정류기(rectifier), 응축기(condenser), 증발기(evaporator), 냉매 열교환기(precooler) 및 에어코일(aircoil) 등으로 구성된다. 실선과 점선은 각각 액류(liquid flow) 및 기류(vapor flow)를 나타낸다. Fig. 1, Fig. 2에 나타난 Absorber와 Desorber는 실제 GAX System에서는 Fig. 3에서와 같이 각각 3개의 구성요소들로 나누어진다. ABSIM에서의 구성요소들은 Fig. 3과 동일하게 설정되었다. 본 논문에서 “농용액(strong solution)”은 냉매(refrigerant, 암모니아)가 농축되어 있음을 의미하고, “희용액(weak solution)”은 그 반대의 경우를 의미한다. HGAX 사이클에서는 디소버 기둥의 상부에 있는 혼합기(mixer)로부터 농용액이 흘러 들어가고, GFD의 하단으로부터 탈암모니아(desorption) 과정을 거친 희용액은 고온의 상태로 SHD의 셸(shell)측으로 들어가 열교환을 마친 후, 냉각되어 GAXA의 상단부로 들어간다. GFD에서 생성된 기류는 SHD와 GAXD에서 생성된 기류와 혼합되어, GAXD의 상단부를 통하여 정류기로 들어간다. 정류기에서 정류된 기류는 고농도 상태로(약 97% 이상) 응축기로 유입되고, 응축된 액류는 GAXD의 상단부로 다시 유입된다. 응축기에서 응축된 액류는

Table 1 Base line conditions for cycle modeling

Cycle	Type A	Type B
Thermal conditions	$P_d : 1,900 \text{ kPa}$	$P_d : 1,900 \text{ kPa}$
	$P_o : 1,800 \text{ kPa}$	$P_a : 450 \text{ kPa}$
	$P_e : 460 \text{ kPa}$	$P_e : 10 \text{ kPa}$
	$T_e : 1.6^\circ\text{C}$	$T_e : -72^\circ\text{C}$
UA	$UA_d : 0.06 \text{ kW/K}$	$UA_d : 0.13 \text{ kW/K}$
	$UA_a : 0.2 \text{ kW/K}$	$UA_a : 0.17 \text{ kW/K}$
	$UA_{cd} : 0.5 \text{ kW/K}$	$UA_{cd} : 0.5 \text{ kW/K}$
	$UA_e : 1.4 \text{ kW/K}$	$UA_e : 1.0 \text{ kW/K}$

냉매 열교환기에서 열교환을 한 후 팽창밸브에서 감압되어 증발기로 들어간다. 증발기에서 생성된 기류는 냉매 열교환기를 거치고, HGAX의 특징적 구성요소인 압축기로 유입되어 흡수기 압력으로 송압된 후 HCA의 하단부를 통하여 흡수기로 들어간다. 흡수기로 유입된 기류는 GFD로부터 SHD의 상단부를 통하여 유입된 희용액과 대향류를 이루며 흡수과정을 거친다. 모든 기류는 HCA, SCA 및 GAXA를 통하여 전부 액류에 흡수되고, 흡수과정을 마친 농용액은 HCA의 하단부를 통하여 용액펌프로 들어가 가압된 후 SCA의 셸측을 통하여 GAXD의 상단부로 유입된다. GAXA와 GAXD 사이의 순환루프를(circulation circuit) 통하여 GAX 흡수기에서 GAX 발생기 측으로 내부열이 전달되어 성능이 향상된다.

하이브리드 GAX 사이클에서는 압축기의 첨가에 따른 압축일이 부가되므로 COP는 다음과 같이 정의된다.

$$COP = \frac{Q_e}{Q_d + Q_{comp}} \quad (1)$$

여기서, Q_{comp} 는 이상적인 압축일에(효율=1.0) 해당하는 열량으로 일반적으로 HGAX 사이클에서 전체 투입열량의 약 15% 이내이다.

Fig. 3에 대한 사이클 모델링시의 기준조건은 Table 1에 정리되어 있다. 기준조건은 Type A의 경우 안정된 상태에서 최대의 COP를 갖는 상태이며, Type B의 경우 역시 안정된 상태에서 최저의 증발온도를 갖는 상태이다.

4. 결과 및 토론

본 연구에서는 각각의 경우에 대하여 압력 및 각 구성요소의 UA 값이 성능과 증발온도에 미치는 영향을 감도분석을 통하여 고찰하였다. 작동 유체는 암모니아/물 용액이다.

4.1 Type A(성능향상형)

Fig. 4에 흡수기 압력의 변화에 따른 COP의 변화가 나타나 있다. 흡수기의 압력이 변하는 동안 발생기의 압력은 1,900 kPa, 증발기의 압력은 460 kPa로 일정하게 유지시켰다. 예상했던 바와 같이 COP는 흡수기의 압력이 증가함에 따라서 증가하였다. 이는 흡수기 압력의 증가에 따른 압축기에서의 압축일 증가보다 흡수기와 발생기간의 온도중첩에 의한 내부열 회수(GAX 효과)의 증가량이 더 커서 COP가 상승한 결과를 의미한다. 또한 동일한 조건의 표준 GAX 사이클에서 얻은 약 1.0의 COP보다 하이브리드 사이클의 성능향상형에서는 흡수기의 압력을 변화시킴으로써 COP를 약 1.24까지 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 T_g 의 변화에 따른 COP의 변화를 나타낸다. T_g 의 변화에 따라 COP는 $T_g=265^\circ\text{C}$ 까지 아주 서서히 증가하다가 그 이후로는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 $T_g=265^\circ\text{C}$ 까지는 Q_d , Q_e 및 Q_{comp} 가 모두 지속적으로 증가한 반면 $T_g=265^\circ\text{C}$ 이후로는 Q_d 의 증가율이 현저해지고, 이에 따라 냉매 발생량도 증가하여

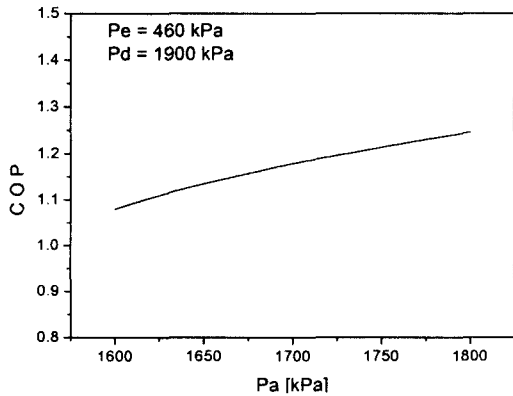


Fig. 4 COP versus absorber pressure.

Q_{comp} 의 증가도 초래하였다. 따라서 Q_d 와 Q_{comp} 의 증가량을 Q_e 의 증가량이 따라 미치지 못하여 COP가 감소하는 결과를 초래하였다. 일반적으로 COP가 감소하기 시작하는 T_g 의 값은 시스템의 온도범위, UA 값 및 유량 등에 따라 결정된다.

Fig. 6에 Type A에서 각 구성요소들의 UA 값 변화에 따른 COP의 변화를 나타내었다. 여기서 UA_0 는 각각의 경우에서 최적값(COP가 최대로 되는 값으로 Table 1에 정리되어 있다)으로 취하였다. 최적점에서의 냉동능력 Q_e 는 10 kW이다. 발생기의 경우 UA의 최적점 이전에는 Q_d , Q_e 및 Q_{comp} 가 모두 지속적으로 증가한 반면 최적점 이후에는 Q_d 와 Q_{comp} 의 증가율에 비하여 Q_e 의 증가율이 미치지 못했다. 예를 들어 UA가 최적

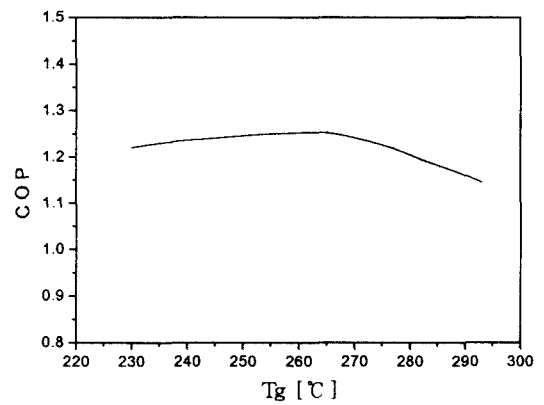


Fig. 5 COP versus hot water inlet temperature in the desorber

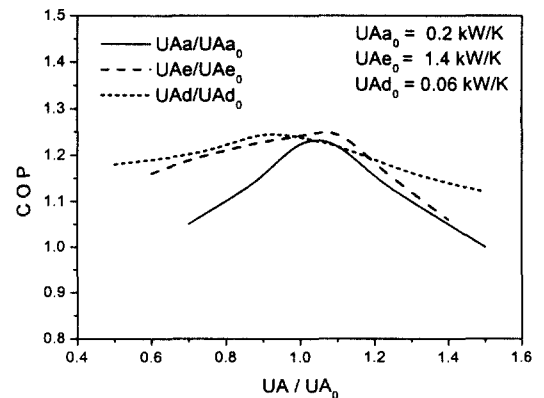


Fig. 6 COP versus UA variation (Type A).

점 기준의 1.5배 되는 지점에서는 Q_d 가 기준점에 비해 70%, Q_{comp} 가 80% 상승하였고 Q_e 는 35% 밖에 상승하지 않아 COP가 감소하는 경향을 나타내었다. 흡수기의 경우 최적점 이전에는 UA 값이 증가함에 따라 Q_e 는 증가하나 Q_d 와 Q_{comp} 는 상대적으로 감소하여 COP의 증가를 초래하였고 최적점 이후에는 Q_d 와 Q_e 의 변화가 거의 없는 대신 Q_{comp} 의 급격한 상승이 COP의 감소를 초래하였다. Q_{comp} 가 증가한 이유는 흡수기의 UA 값이 증가함에 따라 주어진 증발기내의 냉매량에 대하여 흡수기의 흡수용량 증가로 인한 증발기의 압력강하가 발생되고 이에 따라 압축일이 증가했기 때문이다. 흡수기 압력이 1,800 kPa로 일정하게 유지된 상태에서 흡수용량의 증가는 상대적으로 증발기의 압력강하를 초래하며 결국 증발기와 흡수기간의 압력차이가 증가하게 된다. 증발기의 경우 본 조건하에서 증발기 UA 값이 최적점까지는 COP가 미소하게 증가하는 경향을 보여주나 최적점 이후에는 감소하였다. 그 이유는 최적점 이후 증발기 용량증가로 인한 압력강하로 Q_{comp} 가 Q_d , Q_e 에 비해 급격히 증가했기 때문이다.

각 구성요소의 UA 값에 대한 감도분석은 Table 1에 제시된 최적조건에서 다른 조건들이 고정되었을 때 한 개 구성요소의 UA 값만을 변화시킴으로써 실시되었다. 한정된 냉매 및 용액의 질량 유량조건에서 구성요소의 UA 값의 변화로 인해 열량의 변화가 나타났고 이는 다른 구성요소들에 영향을 미쳐 전체 시스템의 성능변화로 이어졌

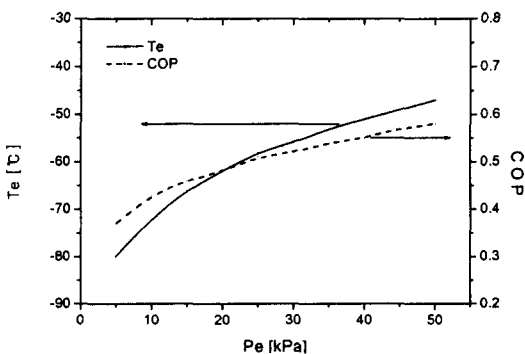


Fig. 7 T_e and COP versus P_e (Type B).

다. 이로써 각 구성요소의 UA 값의 변화가 성능에 미치는 영향의 정도를 알 수 있으며 각 구성요소별로 최적의 UA 값이 존재함을 확인했다.

4.2 Type B(저온획득형)

저온획득용 HGAX 사이클에서는 증발기 압력을 하강시켜 요구되는 저온의 증발온도를 얻는 것이 목적으로 감도분석시의 기준조건들이 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 7에 주어진 발생기 및 흡수기 압력에 대하여 증발기 압력변화에 따른 증발온도와 COP의 변화를 나타내었다. 예상된 바와 같이 증발기 압력이 하강함에 따라 -80°C 까지의 증발온도를 얻을 수 있었고 그에 따라 압축일이 증가한 만큼 COP가 하강함을 볼 수 있다.

Fig. 8에 일정한 발생기 압력과 증발기 압력에 대하여 흡수기 압력의 변화에 따른 COP의 변화를 나타내었다. Type A의 Fig. 4와 비교하여 COP에 대한 흡수기 압력의 영향은 크게 나타나지 않았다. 800 kPa의 흡수기 압력까지는 미소하지만 서서히 증가하는 경향을 나타내다가 그 이후에는 더 이상의 증가 없이 일정하게 유지되는데 그 이유는 GAX 효과에 의한 Q_d 의 감소폭과 Q_{comp} 의 증가폭이 서로 상당하기 때문이다.

Fig. 9에 각 구성부품의 UA 값 변화에 따른 COP의 변화가 나타나 있다. 최적조건은 Table 1에 제시되어 있으며, 이때 냉동능력 Q_e 는 6.5 kW이다. 발생기의 경우 본 연구의 조건하에서 최적 UA 값이 0.13 kW/K로 명확하게 설정된다.

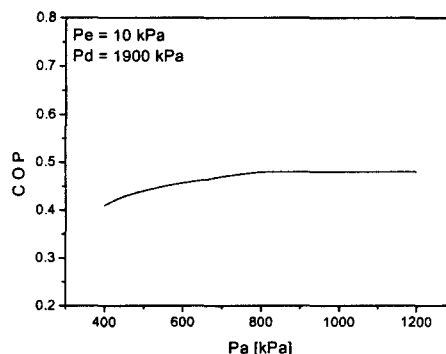


Fig. 8 COP versus P_a (Type B).

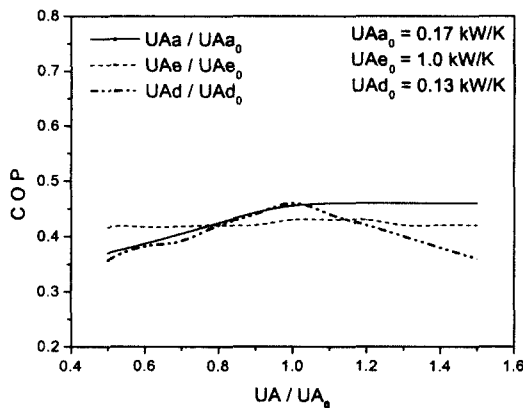


Fig. 9 COP versus UA variation (Type B).

흡수기의 경우 UA 값이 증가함에 따라 COP가 미소하게 증가하나 Fig. 6의 Type A에 비하여 COP에 대한 UA 값의 영향이 작고, 최적치의 값도 다르게 나타남을 알 수가 있다. 이는 증발기 압력 및 흡수기 압력 등 열적조건이 Type A와 비교하여 현저하게 다르기 때문이다. 증발기의 경우 본 조건하에서는 증발기 UA 값의 변화는 COP에 거의 영향을 미치지 못하였다. 그 이유는 감도분석 범위 내에서 Q_d , Q_e 및 Q_{comp} 가 모두 지속적으로 비슷하게 변화했기 때문이며 열량변화의 폭도 최적점에서의 Q_d , Q_e 및 Q_{comp} 에 비해 모두 1% 미만이었다.

5. 결론

본 연구에서의 HGAX 사이클에 대한 연구로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) Type A(성능향상형)의 경우 표준GAX에 비하여 압축기를 이용한 GAX 효과의 증가로 약 24%의 성능향상효과를 얻을 수 있다.

(2) Type B(저온획득형)의 경우 압축기를 이용한 증발압력의 하강효과로부터 -80°C 까지의 증발온도를 얻을 수 있었다.

(3) 성능향상과 저온획득을 위한 HGAX 사이클의 각 구성부품에 대한 UA 값의 최적치를 제시하였다.

후 기

본 연구는 2000년도 경희대학교 신입교수연구

지원에 의한 결과임.

참고문헌

1. Erickson, D. C. and Rane, M. V., 1992, The GAX family of absorption cycles, IEA Heat Pump Newsletter, Vol. 10, No. 4, pp. 4-13.
2. Garimella, S., Christensen, R. N. and Lacy, D., 1996, Performance evaluation of a generator-absorber heat exchange heat pump, Applied Thermal Eng., Vol. 16, pp. 591-604.
3. Grossman, G., DeVault, R. and Creswick, F., 1995, Simulation and performance analysis of an ammonia-water absorption heat pump based on GAX cycle, ASHRAE Transaction, Vol. 101, No. 1, pp. 1189-1196.
4. Kang, Y. T., Kunugi, Y. and Kashiwagi, T., 2000, Review of advanced absorption cycles: Performance improvement and temperature lift enhancement, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, No. 5, pp. 388-411.
5. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 1999, An advanced GAX cycle for waste heat recovery: WGAX, Applied Thermal Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 933-947.
6. Kang, Y. T., Sambe, Y. and Kashiwagi, T., 2000, An environmentally friendly advanced GAX cycle for panel heating-PGAX cycle, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, No. 5, pp. 788-387.
7. Herold, K. E., He, X., Erickson, D. C. and Rane, M. V., 1991, The Branched GAX absorption heat pump cycle, Proceedings of Absorption Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, pp. 127-132.
8. Erickson, D. C. and Anand, G., 1996, VX GAX cycle development, Proceedings of International Absorption Heat Pump Conference, Montreal, Canada, Vol. 2, pp. 805-815.
9. Grossman, G. and Wilk, M., 1994, Advanced modular simulation of absorption systems, International Journal of Refrigeration, Vol. 17, pp. 131-244.