

# 미국 및 일본의 암모니아-물 흡수식 열펌프 기술(1)

- 미국의 GAX 사이클 -

## Ammonia-water absorption technologies in USA and Japan(1)

- GAX Cycles in USA -

강 용 태  
Y. T. Kang

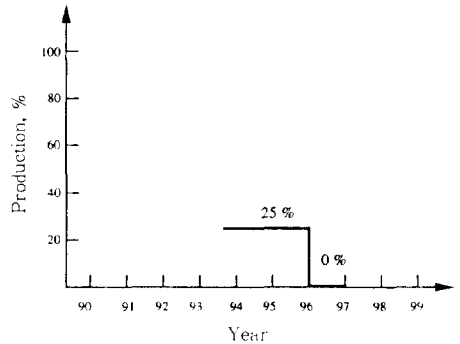
동경농공대학 공학부 기계시스템 공학과



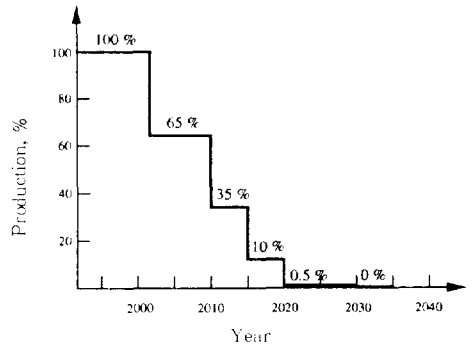
- 1965년생
- 공기조화 및 냉동에 관련한 비등열전달을 전공하였으며, 흡수식 열펌프, 열교환기설계, 혼합냉매에서의 열 및 물질전달등에 관심을 가지고 있다.

### 1. 서 론

1992년, 몬트리얼 협정에 의하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Chlorofluorocarbon(CFC) 및 Hydrochlorofluorocarbon(HCFC)의 사용이 각각 1997년 및 2020년부터 전면 금지된다. 이들을 대체하기 위하여 여러 연구들이 진행되어온바, 암모니아-물 시스템을 비롯한 열구동 흡수식 시스템이 가정용 및 소형 상업용(암모니아-물 시스템) 및 대형 산업용(리튬브로마이드-물 시스템)에서 다시 각광을 받고 있다. 가스구동 흡수식 시스템은 인류와 환경에 여러 가지 유익을 가져다준다. 첫째, 시스템의 고효율에 따른 매력적인 경제성을 제공하고, 둘째 천연가스의 사용으로 인하여 여름철 피크 전력소요(peak electric demand)를 완화하고, 셋째 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 발생을 감소시킴으로써 지구온난화 현상을 완화한다. 실제로 가스구동 흡수식 시스템으로부터의 CO<sub>2</sub> 발생량은 증기보일러를 사용하는 전기구동 냉동기에 비하여 85% 수준인 것으로 보고되었다(Suzuki 등)<sup>(1)</sup>. 네째로 암모니아 및 물과 같은 환경친화적인 냉매들을 사용함으로써 오존층을 파괴하는 CFC 및 FCFC계 냉매들을 대체할 수 있는 이점이 있다.



(a) CFC refrigerants



(b) HCFC refrigerants

Fig.1 Phasing-out schedules of CFC and HCFC refrigerants

고성능 흡수식 열펌프 사이클은 그 이용목적에 따라 성능증가(performance enhancement) 그룹 및 온도리프트 증가(temperature lift enhancement) 그룹 등, 두 그룹으로 분류된다. 각각의 사이클들에 대한 특성들은 Furutera 등<sup>(2)</sup>에 요약되어있다. 이들 고성능 흡수식 사이클들 중 일부는 현재 미국, 일본 및 한국에서 브레드보드(breadboard) 또는 프로토타입(prototype)의 단계로 실험이 진행되고 있다. 현재까지는 몇 가지 기술적인 어려움으로 인하여 고성능 GAX (Generator Absorber heat eXchange) 사이클은 상용화되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 당면한 기술적인 문제점들을 해결한 후, 고성능 GAX 사이클이 수년 내에 상용화 될 것으로 예상되고 있다.

고성능 GAX 사이클은 기본적으로 1단(single stage) 시스템의 형상을 가지고 있지만 흡수기와 재생기간의 온도중첩(temperature overlap) 원리에 의하여 그 어느 단효용(single effect) 사이클보다 높은 COP(Coefficient Of Performance)를 제공한다. 일반적으로 암모니아-물 흡수식 사이클에서는 재생기(generator)와 디소버(desorber)를 혼용하여 사용하기도 하나, 본 논문에서는 일관성을 위하여 흡수기의 대칭개념인 디소버로 명명하기로 한다. Figure 2에서는 GAX 사이클의 기본원리인 온도중첩의 개념을 설명한다. 점선은 1단 사이클의 저압부를 나타내고, 실선은 GAX 사이클의 저압부를 나타낸다. 1단 사이클의 흡수기 압력이 증가됨에 따라서 그에 해당되는 흡수기 온도도 증가하게 된다. 실제적으로 재생기 출구의 온도가 약 200°C 이상에서는 흡수기와 디소버간에 부분적으로 온도가 중첩된다. 이러한 온도 중첩이 GAX 사이클의 기본원리이며, 부분적으로 중첩된 온도구간 내에서 흡수기로부터 디소버로 내부열이 전달되어 시스템의 성능을 향상시키는 결과를 초래한다. 이 온도중첩의 원리는 같은 흡수식인 리튬브로마이드-물 시스템에서는 얻지 못하는 암모니아-물 시스템만의 특성이다. 일반적으로 GAX 사이클의 성능은 온도리프트에 따라 변화하며, 기본(basic) GAX 사이클과 브랜치드(branched) GAX 사이클의

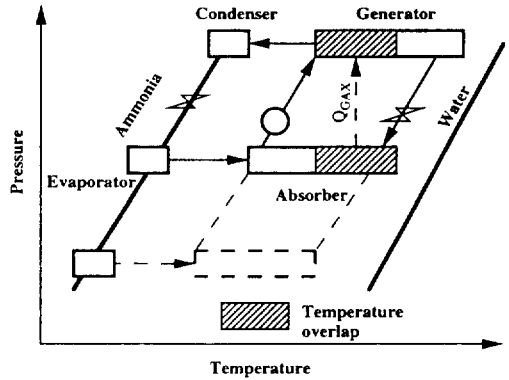


Fig.2 Fundamental concept of the GAX cycle-temperature overlap

경우 약 30°C의 온도리프트에서 단효용 사이클에 비하여 각각 약 70%, 130%의 성능향상을 가져온다. 이러한 성능향상으로 인하여, 암모니아-물 GAX 사이클은 가정용 또는 소형 상업용 건물의 냉난방에 가장 효과적인 시스템으로 간주된다. 또한 GAX 사이클은 증기 압축과정을 첨가함으로써 성능계수를 더욱더 높일 수 있거나, -20 내지 -30°C의 저온냉매를 얻을 수 있어서 식품냉동 분야에도 응용될 수가 있다(GAX 하이브리드). 최근에는 GAX 사이클로부터 60°C 이상의 열수를 얻어서 한국의 온돌 시스템에 적용하려는 연구도 진행되고 있다(Kashiwagi 등)<sup>(3)</sup>.

요약하면, 현재 흡수식 기술에 대한 연구가 미국, 일본 및 한국에서 심도 있게 진행되고 있는바, 본 연구에서는 미국과 일본에서의 연구개발동향, 마케팅 조사결과, 새로운 흡수식 기술 및 가장 각광을 받고있는 GAX 사이클을 소개하고, 한국의 기후, 시장, 공간의 조건하에서 가장 효율적이고 바람직한 연구개발 방향을 제시함을 목적으로 한다. 이를 위하여, 세부내용들로서 사이클 모델링, 열 교환기설계 및 경제성 평가, 열 및 물질전달 특성의 가시화, 실험적 검증, 그리고 기술적으로 중요한 이슈가 되고있는 암모니아에 의한 부식문제, 용액펌프, 표면처리, 암모니아 농도측정법, 냉각수 성능평가 및 새로이 개발되고 있는 차세대 흡수식 용액 등을 제시한다. 본 연구의 제1단계로서 미국에서의 흡수식 연구 동향을 소

개하고 기본적인 흡수식 기술들을 설명한다. 제2 단계로서 일본에서의 연구동향과 기술축적은 본 본문의 후편에서 소개하고자 한다.

## 2. R & D 전략

흡수식 기술의 R & D 분야는 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 사이클 모델링, 부품 설계, 유동의 가시화 및 필드 테스트(field test) 등, 네 분야로 나눌 수 있다. 첫째로 사이클 모델링 분야에서는 시스템의 성능향상에 목표를 둔다. 현재까지 단일효용, 이중효용 및 기본 GAX 사이클에 관한 모델링은 이론 성적계수(ideal COP)가 각각 0.6, 1.0 그리고 1.2 정도로 얻어지고 있다. 사이클 모델링 분야에서는 변수분석(parametric analysis)을 통하여 정해진 용량에 대해서 가장 높은 성능계수를 제공하는 최적의 사이클조건을 결정한다. 흡수식 사이클 모델링 프로그램으로는 ABSIM(Absorption Simulation)과 EES(Engineering Equation Solver)가 주로 사용되고 있다. ABSIM은 모듈러 타입(modular type)의 프로그램으로서 미국 DOE/ORNL의 지원하에 Dr. Grossman에 의하여 개발되었다. 본 프로그램은 지배방정식을 포함하는 각 부품에 대한 서브루틴

(subroutine)을 포함하고 있고, 대부분의 흡수식 작동 유체에 대한 열적 성질들에 대한 서브루틴도 포함하고 있다. 최근에는 윈도우 버전이 만들어져서 미국내 흡수식 연구자들에게 제공되고 있다. EES는 비선형 대수 및 미분 방정식에 대한 해를 구하는데 이용되나, 물, 건기 및 습기, 대부분의 CFC 및 HCFC에 대한 열적 및 물리적 성질들에 대한 함수들(functions)을 포함하고 있어 흡수식 사이클 모델링에도 유용하게 이용되고 있다. 이러한 프로그램들을 통한 사이클 모델링 과정에서 결정된 최적의 열적 조건들은 부품설계 및 가격 분석(component design and cost analysis) 과정을 거친다. 두번째의 부품설계 및 가격 분석 과정에서는 시스템의 소형화 및 경량화(compactness)에 목표를 둔다. 이 과정을 통하여 박막(thin falling film) 또는 버블(bubble) 타입 등의 효율적인 열전달 메커니즘(mechanism)을 개발하고, 넓은 열전달 표면을 제공하는 여러 가지 열교환기의 형상들을 개발한다. 각 열교환기의 형상에 대하여 사이클 모델링 과정에서 결정된 시스템의 열적조건에 맞게 부품의 사양(관경, 관 길이, 재료 및 부품형상등)을 결정한다. 부품의 사이즈를 결정한 후, 시스템의 열적 기하학적 조건들로부터 제작비(manufacturing cost) 및 계절별 운영비(seasonal operating

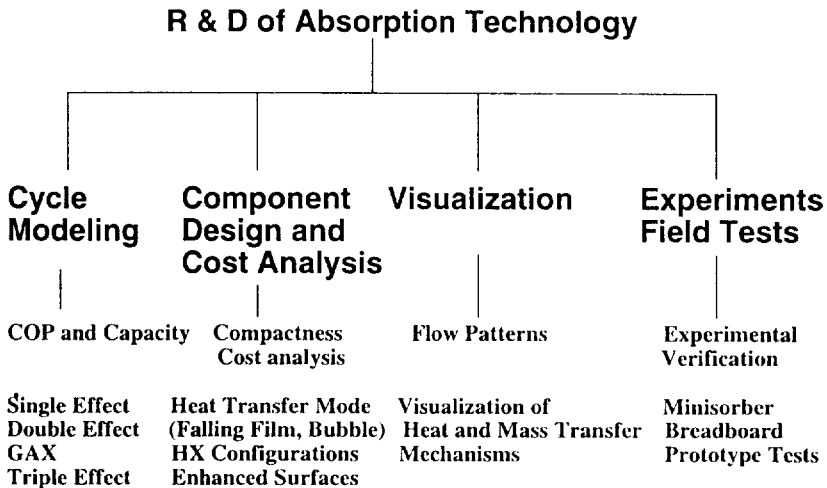


Fig.3 R & D groups in absorption heat pump systems

cost) 등을 평가한다. 셋째로 부품설계 및 가격 분석 과정을 거친 후, 유동의 가시화 과정을 통하여 열교환기 내의 열 및 물질전달 특성을 검증한다. 가시화 과정에서는 유동의 역류(flooding) 현상이 나타나는가를 확인하여야 한다. 액류(liquid flow)와 기류(vapor flow) 사이의 대향류 흡수(countercurrent absorption) 과정의 경우, 흡수율(absorption rate)은 기류가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고되고 있다(Kang 등)<sup>(4)</sup>. 그러나 기류의 유속이 임계치 이상 높아지면 액류의 역류현상이 발생하여 실제 시스템의 성능에 치명적인 영향을 초래한다. 흡수식 시스템에서의 이러한 액류의 역류현상에 관한 연구결과는 Kang 등<sup>(5)</sup>에 잘 나타나 있다. 넷째로, 각 부품 및 전체 사이클에 대한 실험적 검증과정이 미니 소버(minisorber), 브레드보드(breadboard) 및 프로토타입(prototype) 실험 등을 통하여 필수적으로 요구된다. 실험적 검증과정동안 유량, 압력, 온도, 액류의 위치 등을 조절하며, 사이클 모델링 과정에서 얻어진 성능 및 용량을 얻을 수 있는지를 확인한다. 위의 네 과정은 최종의 성능 목표치를 얻을 때까지 상호 반복과정(iteration)을 거친다.

### 3. 미국내의 개발현황 및 시장성

Table 1에서 보는바와 같이 여러 응용분야에

서 많은 흡수식 시스템들이 응용되고 있다. 냉난방 응용분야(열펌프 등)에서는 주로 시스템의 성능 향상에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다. 기존의 흡수식 제품에서는 냉방의 경우 흡수식 냉동기로서, 난방의 경우 보일러를 첨가한 난방사이클로서 각각의 다른 사이클이 이용되어 왔으나, 흡수식 열 펌프 사이클은 단일의 기기(single hardware)로서 냉난방을 동시에 제공할 수 있으므로 공간활용의 관점에서 매력적인 이점을 가지고 있다. 냉동분야(refrigeration)에서는 보다 낮은 냉매온도를 얻기 위하여 온도 리프트를 높이는데 초점을 두고 있다. 몇몇의 암모니아 흡수냉동 사이클들이 음식처리 및 저장과 얼음 생산 등의 분야에서 응용되고 있다. 최근, Kahn 등<sup>(6)</sup>은  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 증발기 온도와  $60^{\circ}\text{C}$  응축기 온도를 얻기 위하여 새로운 난방냉동 혼합사이클을(Combined Heating and Refrigeration, CHR) 제안하였다. 또한 많은 흡수식 사이클들이 폐열 이용을 위하여 응용되고 있는바, Kalina 사이클은 폐열회수를 위한 대표적인 흡수동력 혼합사이클(Combined Absorption and Power Cycle)이다. Kalina 사이클은 암모니아-물을 작동유체로 하여  $500^{\circ}\text{C}$ 의 저 레벨 에너지(Low Level Energy)를 동력발생을 위하여 재사용함으로써, 동일 조건의 Rankine 사이클보다 약 60 내지 90% 높은 효율을 얻을 수 있는 것으로 보고되었다(Kalina<sup>(7)</sup>). 본 연구에서는 가정용 또는 소형 상

Table 1 Advanced absorption cycles developed in various applications

Application areas	Cycles developed	Objectives and Goals
Heating and cooling (Heat pump)	Triple effect GAX, Branch GAX RA, Hybrid	To obtain a higher COP $\text{COP}_r = 0.8$ $\text{COP}_h = 1.5$ from GAX
Refrigeration	Absorption refrigeration CHR	To obtain a higher temperature lift $T_c$ : as low as $-60^{\circ}\text{C}$
Waste heat recovery	CAP Kalina	To utilize a low temperature level energy To use waste heat as low as $70^{\circ}\text{C}$

Table 2 Summary of the R &amp; D status for absorption technology in USA

Company (Sources)	Goals	Exp. Results Cycle and HXs	Status and Comments
GRI (Ryan <sup>(8)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.7 COP <sub>h</sub> =1.5at 47°F COP <sub>h</sub> =1.1at -10°F Capacity : 3-7.5RT Retail price : For 3 RT \$ 1,800/RT at 50K Units/yr. For 5 RT \$ 1,300/RT	Prototype and Breadboard : Jan. 1995 : Began construction of 1st prototype Jun. 1995 : First Prototype started Nov. 1995 : Prototype relocated outdoors Dec. 1995 : Low ambient testing	5 yrs Payback for Residential Criteria 3 yrs Payback for Commer. Criteria Must have one HVAC Manufacturer as Customer by end of 1996.
DOE (Fiskum et al. <sup>(9)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.75 COP <sub>h</sub> =1.6 Developing advanced absorption fluids : Q2 fluid	Phase I : ~1996 Cycle Devel. Component Devel. Phase II : ~ present Lab. Experiments Commercialization	Hi-Cool Project : Battelle/Arctek Energy Concept Phillips Eng. R. A. Technology Rocky Research Carrier
Carrier (Merill <sup>(10)</sup> )	3RT Absorber testing Target costs : \$ 114 100 lb, 48 in H Retail price : \$ 550 per RT	Phillips Cycle : Licensed in Oct. 1993	No more R & D fund for GAX
Phillips Engineering (Phillips <sup>(11)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.7 COP <sub>h</sub> =1.5	COP <sub>c</sub> =0.7 Funded by DOE Phillips Cycle Fluted tubes	

Company (Sources)	Goals	Exp. Results Cycle and HXs	Status and Comments
Columbia Gas (Petty <sup>(12)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.75 COP <sub>h</sub> =1.5	Trane GAX cycle Enhanced surfaces	Start from Robur Finished Phase II
Battelle (B. Hanna <sup>(13)</sup> )	Mini-Sorber	Funded by DOE Fluted Abs. and Des. testing	
Energy Concept (Erickson <sup>(14)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.75 COP <sub>h</sub> =1.5 Retail Price : \$ 750/RT	COP <sub>c</sub> =0.7, COP <sub>h</sub> =1.2 BGAX Cycle Coiled fluted tubes	Funded by DOE Hi-Cool Project
Arctek Inc. (Hemmelgarn <sup>(15)</sup> )	COP <sub>c</sub> =0.75 COP <sub>h</sub> =1.5 Retail Price : No Comments Size : ~1,500mm H	COP <sub>c</sub> =0.71, COP <sub>h</sub> =1.43 Phillips Cycle Enhanced surface	Funded by GRI Finished 3 RT Testing Starts 5 RT Very expensive
ATC (Absorption Technology Corp.) (Marsala <sup>(16)</sup> )	COP=0.7 Size 3RT : 787W, 1,015D, 1,065H mm Dealer Price : 3RT : \$ 2,300 5RT : \$ 3,100	COP <sub>c</sub> =0.67 Trane GAX Cycle Perforated fins Fluted tubes	Field Testing : Spring in 1997 Production : Early 1998
Trane (Plazac <sup>(17)</sup> )	Developing Advanced Fluid		No fund for GAX
Robur (Halbig <sup>(18)</sup> )	Chiller COP <sub>c</sub> =0.65 Retail price : \$ 4,200 3RT (Single Effect 3 RT Chiller : \$ 3,200)	COP <sub>c</sub> =0.62	Was on the market Expects to be on the market again in 1997

업용 열펌프에 대한 연구동향만을 소개하기로 한다.

대부분의 흡수식 연구기관 및 회사들은 1995년말 또는 1996년초까지 기본 GAX 사이클에 관한 연구를 마무리한 상태이다. 최근에는 주로 하이브리드 GAX 또는 판넬 GAX 사이클 등의 진보된 GAX 사이클들에 대한 연구가 수행 중에 있다. Table 2에 미국 내에서의 암모니아-물 흡수식 연구동향이 정리되어 있다. Table 2의 제2열은 각 시스템의 성능, 사이즈 및 가격에 대한 최종 목표치들을 나타내고 있는바, 대체적으로 성적계수에 대한 실험목표치는 표준 외기조건 하에서(냉방 외기온도 35°C, 난방 외기온도 8.3°C), 냉방의 경우 최소 0.7, 난방의 경우 최소 1.35로 정하고 있다. 소비자 가격에 대한 목표치의 경우에 있어서는 각 연구기관마다 상당히 다르게 책정되고 있다. 그 이유는 일부 연구기관의 경우 기술적인 문제로 인하여 값비싼 재료를 사용하기 때문이며, 이로 인하여 실제로 얻어진 COP와 사이즈에서 차이를 나타내고 있다. 제3열은 현재까지 얻어진 실험결과와 차후의 계획을 나타내고 있다. 대부분의 연구기관에서 제품의 소형화를 위하여 여러가지 확장된 열전달면(enhanced surfaces)들을 사용하고 있다. 확장된 열전달 면

들에 대하여는 부품설계 상(section)에서 자세히 설명된다. 제4열은 현재의 연구개발 상태 및 기술적 문제점들을 나타낸다. Table 2에 소개된 각 연구기관들의 목표치와 한국적 현실을 고려한 후, 본 연구에서는 최종 소비자 가격으로 냉동톤당 \$1,000 내지 1,250을 적당한 가격으로 제시하고자 한다. 실례로, 가정용의 3RT 제품의 경우 약 \$3,000의 소비자 가격을 목표로 하면 일본 및 한국을 포함하는 대부분의 아시아국가에서 기존의 전기구동식 에어컨에 충분한 경쟁력이 있는 것으로 판단된다.

Table 3에서는 가정용(3RT) 및 소형 상업용(5RT)에 대한 미국내에서의 시장규모를 나타내고 있다. 가정용 및 소형 상업용의 총 예상규모로 각각 117,194 Units 및 65,707 Units로 조사되었고, 총 유닛트 수 및 냉동톤은 각각 182,901 Units 및 680,117 Tons으로 조사되었다.

#### 4. 미국 내에서 개발된 GAX 시스템

현재까지 미국 내에서 개발되거나 연구되고 있는 GAX 사이클들이 Table 4에 정리되어 있다. 제2열은 각 사이클들의 특성을 나타내고 제3열은 특허권 등의 취득상황 등의 연구개발상태를

Table 3 Market volumes for absorption systems in US

Applications	Residential applications (3RT average)	Commercial applications (5RT average)
Single family or commercial building stocks	77,795,000	110,000,000
Single family or commercial stocks with Gas fuel	40,674,000	44,000,000
Replacements market sales	202,593	205,333
New construction market sales	148,980	123,200
Maximum market sales (tons per year)	351,583	328,533
Maximum market (units per year)	117,194	65,707
Total Tons	680,116	
Total units	182,901	

Table 4 Summary of Various GAX Heat Pump Cycles Developed

Cycle	Cycle characteristics	Development status
1. Standard GAX	Use hydronic circuit in the GAX absorber and desorber with a countercurrent flow No split in strong solution circuit	Open by Altenkirch, 1913
2. Trane Cycle (Mohahl and Hayes <sup>(19)</sup> )	No hydronic circuit in the GAX absorber (countercurrent flow) and desorber (cocurrent flow) Split the strong solution before SCA	Open Used by Trane, OSU, DOE, E&W Battelle, Carrier
3. Phillips Cycle (Phillips <sup>(20)</sup> )	No hydronic circuit in the GAX absorber and desorber with a countercurrent flow Split the strong solution after SCA Higher COP than Trane cycle	Patented by GRI
4. LHX Cycle (Garimella et al. <sup>(21)</sup> )	GAX cycle for ambient temperature lower than $-4.5^{\circ}\text{C}$	Open Used by GRI
5. Branched GAX (Herold, et al. <sup>(33)</sup> )	Add another solution pump to the standard GAX cycle to improve cycle COP	Open Used by Energy Concept
6. Semi-GAX (Erickson and Tang <sup>(23)</sup> )	Three pressure levels : internal heat exchange between intermediate absorber and High desorber	Open Used by Energy Concept
7. VX Cycle Resorption Cycle (Erickson and Anand <sup>(24)</sup> )	Three pressure levels Waste heat powered ( $T_{\text{gen}} = 71^{\circ}\text{C}$ )	Open, Used by Energy Concept RA Technology
8. Semi-Hydronic Circuit(Garimella et al. <sup>(21)</sup> )	GAX cycle with partial DX coils	Open, Used by GRI Energy Concept
9. GAX Hybrid (Suzuki et al <sup>(11)</sup> )	Add a mechanical vapor compression process between evaporator and absorber	Developing by TUAT
10. GAX Panel	Modified GAX cycle for panel heating	Developing by OSU, TUAT



나타낸다. 각각의 사이클들에 대한 특성은 제1열에 나타낸 참고문헌들에 잘 설명되어 있으므로, 본 연구에서는 표준 GAX(standard GAX) 사이클에 대해서만 간단히 소개하기로 한다. Figure 4에서 보는 바와 같이 암모니아-물의 표준사이클은 수냉흡수기(Hydronic Cooled Absorber, HCA), 용액냉각 흡수기(Solution Cooled Absorber, SCA), GAX 흡수기(GAX Absorber, GAXA),

개스구동 디소버(Gas Fired Desorber, GFD), 용액가열 디소버(Solution Heated Desorber, SHD), GAS 디소버(GAX Desorber, GAXD), 정류기(rectifier), 응축기(condenser), 증발기(evaporator), 냉매 열교환기(precooler) 및 에어코일(aircoils) 등으로 구성된다. 실선과 점선은 각각 액류(liquid flow) 및 기류(vapor flow)를 나타낸다. 본 논문에서 “농용액(strong solution)”은 냉매(refrigerant, 암모니아)가 농축되어 있음은 의미하고, “희 용액(weak solution)”은 그 반대의 경우를 의미한다. 표준 GAX 사이클에서는 디소버 컬럼의 상부에 있는 혼합기(mixer)로부터 농용액이 흘러 들어가고, GFD의 하단으로부터 탈암모니아(desorption) 과정을 거친 희용액은 고온의 상태로 SHD의 쉘(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 재유입된다. 응축기에서 응축된 액류는 용액열교환기에서 열교환 후

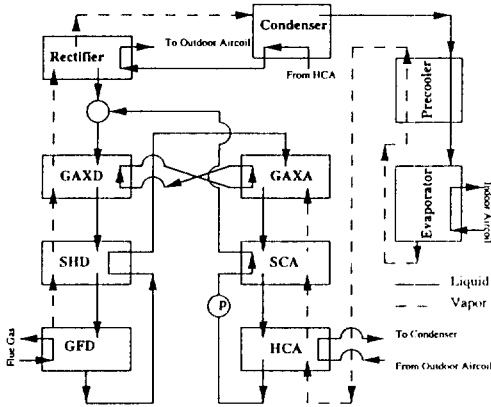


Fig.4 System diagram of a fundamental GAX system using ammonia-water solution pair

Table 5 Fundamental characteristics of each component of the GAX system

Component	Condenser	Evaporator	Rectifier	Absorber	Desorber
Purpose	Condensation of vapor	Evaporation of liquid	Increase vapor concentration	Increase liquid concentration	Decrease liquid concentration
Function	Heat rejection	Heat addition	Heat rejection	Heat rejection	Heat addition
Pressure	High	Low	High	Low	High
Vapor concentration	High ( $x_{vh} > 97\%$ )	High ( $x_{vl} > 97\%$ )	Intermediate (94~97%)	Low (65~99.5%)	Low (70~99.5%)
Highest temperature	Bulk vapor	Interface	Bulk vapor	Interface	Bulk vapor
Mass transfer direction	All the vapor condensed ( $x_l < z < x_{vh}$ )	All the liquid evaporated ( $x_l < z < x_{vl}$ )	Some vapor rectified ( $z < x_l$ )	Absorption and desorption ( $z > x_{vh}$ )	Desorption and absorption ( $z > x_{vl}$ )
Liquid and vapor flows	Co-current	Co-current	Counter-current	Counter-current	Counter-current

평창밸브에서 감압되어 증발기로 들어간다. 증발기에서 생성된 기류는 용액열교환기를 거친 후 HCA의 하단부를 통하여 흡수기로 들어가, GDF로부터 GAXD의 상단부를 통하여 유입된 희용액과 대향류(counter current flow)를 이루며 흡수과정을 거친다. 모든 기류는 HCA, SCA 및 GAXA를 통하여 모두 액류에 흡수되고, 흡수과정을 마친 농용액은 HCA의 하단부를 통하여 용액펌프로 들어가, 가압된 후 SCA의 셀측을 통하여 GAXD의 상단부로 유입된다. GAXA와 GAXD 사이의 순환루프를(circulation circuit) 통하여 GAX 흡수기에서 GAX 디소버 측으로 내부열이 전달되어 성능이 향상된다. Table 5에 GAX 사이클을 구성하는 각 요소들에 대한 특성이 요약되어 있다. 성능을 높이기 위하여 일반적으로 흡수기, 디소버 및 정류기에서는 용액류와 기류간에, 그리고 용액류와 냉각수간에 서로 다른 두 대향류를 갖는다. 그러나 응축기 및 증발기에 대하여는 부품의 특성상 용액류와 냉각수간에는 대향류를, 용액류와 기류간에는 향류(cocurrent flow)를 이룬다.

Table 4에 제시된 표준 GAX 사이클, 트레인(Trane) GAX 사이클, 그리고 필립스(Phillips) GAX 사이클은 제2열에 설명된 바와 같이 농용액루프에서의 분기위치(split location)를 제외하고는 기본적으로 동일한 사이클들이나, 시스템의 열적특성에 의하여 필립스 GAX 사이클이 가장 높은 성능계수를 제공한다. 겨울철 외기온도가  $-4.5^{\circ}\text{C}$  이하의 경우 GAX 사이클의 온도중첩에 의한 효과가 사라지게 되어 표준 GAX 사이클의 성능이 급격히 떨어지게 되는데(Garrimella 등<sup>(21)</sup>), 이러한 문제를 해결하기 위하여 LHX (Low Temperature Heat Exchanger) 사이클에서는  $-4.5^{\circ}\text{C}$  이하의 외기온도에서 GAX 열교환기를 저온열교환기로 대체하여 높은 성능을 유지할 수 있도록 하였다. 반 수냉식 GAX 사이클(GAX cycle with a hydronic circuit)은 냉방 또는 난방의 운전모드에 따라 응축기 또는 증발기에 직접열교환기(Direct heat exchanger, DX coil)를 사용한다. DX 코일은 냉방모드의 경우 응축기로, 난방모드의 경우 증발기로 작동하게

되는데, 실내로의 암모니아 유입을 차단할 수 있고, 실외기에서 순환펌프가 필요치 않게 되므로, 경제성과 안전성 면에서 가정용 및 소형 상업용 열펌프로써 가장 바람직한 사이클로 판단된다. 하이브리드 GAX 사이클은 흡수기와 증발기 사이에 증기압축과정을 부가하여 냉동 및 난방방에 모두 응용될 수 있도록 한 진보된 혼합사이클이다. 냉동분야에의 응용을 위하여, 증발기의 압력을 하감시킴으로써 저온의 냉매온도를 얻을 수 있고, 흡수기 압력을 상승시킴으로서 보다 향상된 GAX 사이클의 성능을 얻을 수 있다. 한편, 판넬 GAX 사이클은 현재 미국과 일본에서 연구 개발 중에 있으며, 난방운전중  $60^{\circ}\text{C}$  이상의 열수를 얻어서 공간난방과 벽 및 바닥난방을 동시에 가능하도록 한 진보된 GAX 사이클이다. 한국의 온돌방식의 난방시스템에도 응용될 수 있는 사이클로 앞으로의 연구대상으로 추천된다.

## 5. 부품설계 및 유동의 가시화

부품설계 및 가시화 과정의 목적은 흡수과정에서 일어나는 복잡한 열 및 물질전달 과정을 분석하여, 열교환기의 사양 및 크기를 결정한 후, 결정된 열교환기 내부의 유동특성을 가시화 과정을 통하여 확인하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 가장 효과적인 열 및 물질전달 방법을 개발하고, 부품의 소형 경량화를 위하여 다양한 확장된 열교환면(enhanced surfaces)들을 이용한다. 현재 까지 개발된 효율적인 열 및 물질전달방법으로는 박막(thin falling film) 및 기포(bubble)타입이 있다. 판열교환기 내에서의 박막타입과 기포타입 흡수기에 대한 기본적인 원리가 Fig. 5에 나타나 있다. 박막타입은 현재에도 리튬브로마이드 및 암모니아-물의 흡수기 설계에 널리 이용되고 있는 열전달 모드로서, 상대적으로 높은 열전달 계수와 안정된(stable) 운전과정을 제공한다. 그러나 열전달 면이 국부적으로 적셔지지 않는 문제(wettability problem)로 인하여 열전달 능력이 저하되는 경우가 있으며, 액류의 유입부에 액류 디스트리뷰터(liquid distributor)를 반드시 설치하여야 한다. 최근에는 기포타입의 흡수기가 암

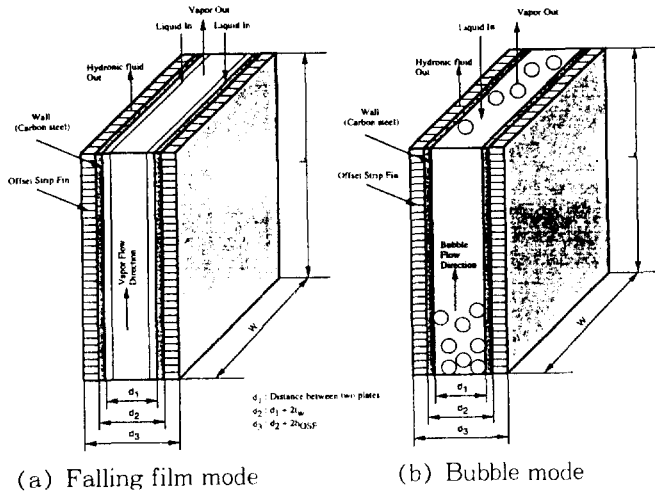


Fig.5 Schematic diagram of plate heat exchangers with falling film and bubble absorption modes

모니아-물의 흡수기 설계에 유력하게 추천되고 있다(Kang 등<sup>(25)</sup>). 기포타입의 흡수기는 높은 열 및 물질전달 계수를 제공할 뿐만 아니라 액류가 벽면에 자동적으로 잘 적시지게 하며, 액류와 기류 사이에 높은 혼합률을(mixing Rate) 제공한다. 박막타입에서는 액류 디스트리뷰터가 요구되는데 반하여, 기포타입에서는 기류 디스트리뷰터(vapor distributor)의 설치가 요구되는데, 일반적으로 액류 디스트리뷰터보다는 기류 디스트리뷰터가 설계면에서 용이하다. Table 6에 박막 및 기포타입의 특성들이 요약되어 있다. 흡수시스템의 각 구성요소들의 특성에 기초하여, Kang 등<sup>(26)</sup>은 암모니아-물의 열 및 물질전달을 동시에 고려한 후 박막 및 기포방식에 대한 실제적인 열교환기 설계모델을 개발하였다. 특히 박막의 흡수 과정에 대하여 일반화된 z맵(z-Map)을 개발하여 각 구성요소들의 열 및 물질전달 특성들을 분석하였다(kang 등<sup>(27)</sup>). 본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 일반화된 z맵에 대하여 간단히 설명하고자 한다. z의 물리적 의미는 흡수되거나 증발되는 기류 또는 액류중 암모니아의 비율로, 암모니아 및 물의 물질전달방향을 나타내주는 중요한 파라미터(parameter)로서 다음의 식으로 표시된다.

$$z = N_{NH_3} / (N_{NH_3} + N_{H_2O}) \quad (1)$$

여기서 N은 몰 플럭스(molar flux)로서 흡수 과정에 대하여 양의 값을, 증발 과정에 대하여는 음의 값을 갖는다. z맵은 물질의 확산 및 물질 보존식을 고려하여 결정된다. 확산식으로부터 얻어진  $N_{L,i}$ 와 물질 보존식으로부터 얻어진  $N_{L,m}$ 의 두 선들의 교점이 z의 최종값으로 결정된다. z의 값이 1.0보다 작을 경우는 암모니아와 물 모두 동일 방향으로의 물질전달을 의미하며, 1.0보다 클 경우 흡수 과정에 대하여 암모니아는 흡수되는 반면 물은 액류에서 기류로 증발됨을(water desorption) 의미한다. z맵으로부터, 정류기에서는  $z < x_i$ , 응축기에서는  $x_i < z < x_{i,m}$ , 증발기에서는  $x_i < z < x_{i,m}$ , 흡수기에서는  $x_{i,b} < z$ , 디소버에서는  $x_{i,b} < z$ 의 결과를 얻었다. 여기서 각 구성요소의 특성으로부터, 흡수기의 경우 벌크기류(bulk vapor flow)의 농도,  $x_{v,b}$ 는 액류와 기류의 접촉면(interface)에서의 평형농도(equilibrium concentration),  $x_{v,i}$ 보다 높으며, 정류기, 응축기, 증발기 및 디소버에서는 그 반대이다. 따라서 위의 결과로부터 정류기, 증발기 및 응축기에서는 암모니아와 물은 항상 동일 방향으로 전달되며, 흡수기와 디소버에서는 암모니아와 물이 동일 또

Table 6 Fundamental characteristics of the falling film and bubble modes

Heat Transfer Mode	Falling Film mode	Bubble modes
Configuration	Horizontal Tube Bundles Vertical tubes	Packed Type Plate HX
Interfacial Area	Small	Large
Heat Transfer Area	~Interfacial Area	Smaller than Interfacial Area
Mixing	Poor	Excellent
Wettability	Critical	Excellent
Liquid Distributor	Yes	No
Vapor Distributor	No	Yes/Orifice Vapor Management
Flooding	Yes for Counter No for Cocurrent	Yes
Heat and mass transfer	Liquid and vapor	Liquid and vapor
Compactness	Good	Excellent

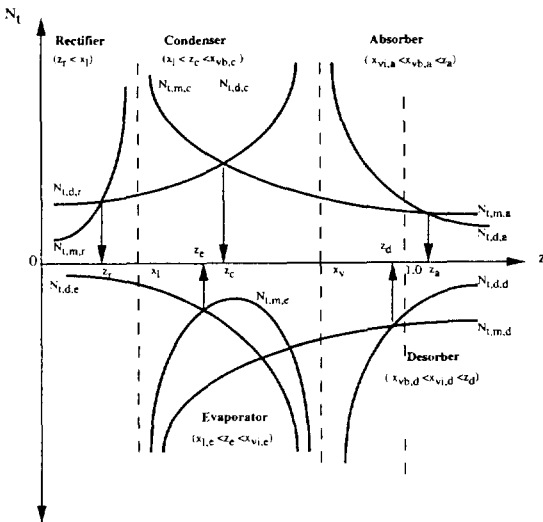


Fig. 6 z-map for the ammonia-water absorption heat pump systems

는 반대방향으로 전달됨을 알게 되었다. 실제로 이러한 결과는 Kang 등<sup>(26)</sup>의 실험결과를 통해서도 검증되었다.

Table 7에 리튬브로마이드와 암모니아-물 흡수시스템에 대한 특성을 비교하였다. 각각의 특성들을 박막 및 기포 방식에 대하여 설명하였는데, 리튬브로마이드 시스템에 대하여도 기포식 흡수기를 적용할 수 있는지의 가능성에 대한 연구가 앞으로 더 요구된다.

흡수식 열펌프에서는 열 및 물질전달 성능을 높이기 위하여 관내관(tube in tube)방식, 쉘내관(tube in shell) 방식 또는 판 열교환기식(plate heat exchanger)등 여러 가지 형상의 열교환기들을 적용하고 있다. 관내관 방식에서는 다른 방식에 비하여 열전달계수가 낮고, 압력강하가 비교적 높은 편이며, 쉘내관 방식의 경우 압력강하는 낮으나 제작비가 높은 것이 문제가 된다. 관내관 또는 쉘내관의 방식으로 플루티드(fluted) 튜브는 뛰어난 열전달 능력으로 인하여 흡수기, 응축기 및 증발기의 설계에 이용된다

Table 7 Comparisons of absorption mechanisms in LiBr/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub> systems

System	LiBr-H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-NH <sub>3</sub>
General Description		
COP	Single Effect : ~0.7 Double Effect : ~1.2	Single : ~0.5, Double : ~0.7 GAX : ~0.7, ~1.5
Recommended Capacity	Over 20 RT	Smaller than 20 RT
Components	Relatively Simple	Complicated
System Pressure	Vacuum (0.01~0.1 psia)	Up to 20 bars(GAX) (60~320psia)
Solution Pump	Safe and Easy	Heart of the system
Crystalization Problem	Serious	No
Corrosion Problem	Minor	At high Temp.
Air Cooling Mode	Difficult	Yes
Heat Pump	Very Difficult	Yes
Absorber/Desorber Componets		
Heat Transfer Mechanism	Absorber : Falling film, Bubble(?) Desorber : Pool Boiling, Falling Film Forced Convective	Absorber : Falling Film, Bubble Desorber : Pool Boiling, Falling Film Forced Convective
Heat and Mass Transfer Direction	Heat Transfer : Both Directions Mass Transfer : Vapor to Liquid	Heat Transfer : Both Directions Mass Transfer : Both Directions
Controlling Resistance	Mass Transfer in Liquid Region	Falling Film Mass Transfer in Vapor Bubble Mass Transfer in Liquid Heat Transfer in Vapor
Temp. & Conc. Gradient along the height	Not Important	Strongly required
Binary mixture in Vapor	No Need Rectifier	Need Rectifier

(Kang 등<sup>(29)</sup>). 또한 최근에는 암모니아-물의 흡수식 시스템에 여러 가지 형상의 판열교환기를 사용하는 것이 고려되고 있다. 표준 판열교환기에(standard plate heat exchanger) 여러 가지 환(fin)들을 삽입하여 열 및 물질전달 계수를 높이고, 기류 및 액류간의 혼합을 용이하게 하고, 액류와 열전달면 사이의 접촉면을 최대로 증가하도록 하는 방법이 이용되고 있다. Table 8에는 흡수식 열펌프에 적용되고 있는 여러 가지 확장된 열전달 면들을 정리하였는바, 이러한 확장면들이 판 열교환기들과 함께 사용되는 것이 추천된다.

확장면(enhanced surface)을 가진 여러 가지 형상의 열교환기들은 내부 유동특성 및 열전달 모드를 확인하기 위하여 투명한 시험부품(transparent test section)을 이용하여 가시화과정을 거친다. 특별히 박막 열교환기의 경우, 액류와 열전달면 사이의 접촉율(wettability)을 가시화 과정을 통하여 반드시 확인하여야 하고, 기포 열교환기의 경우, 액류와 기류의 혼합, 기류의 분포, 액류면의 높이(liquid level) 등을 가시화 과정동안 검증하여야 한다. 대향류의 박막 및 기포 열교환기에서는 기류에 의한 액류의 역류현상(flooding phenomenon)을 피하도록 설계하여야 하는데, 가시화 과정에서 역류현상의 유무도 반드시 확인하여야 한다. 열교환기 내부에 역류현상이 존재할 경우, 압력강하가 갑자기 증가하며, 열전달 능력이 현저히 악화된다. Figure 7에는 암모니아-물 흡수기에 사용되는 꼬여진 내부환을

(twisted insert) 가진 플루티드 관(fluted tube)에 대한 가시화 과정이 실 예로 나타나 있다. 꼬여진 내부환은 액류와 기류의 혼합을 증진시키고, 기류와 액류의 접촉시간을(residence time) 증가시키기 위하여 사용되었다.

6. 실험적 검증

설계된 각 부품들에 대한 실험적 검증은 미니소버(minisorber), 브레드보드(breadboard) 및 프로토타입(prototype) 등을 통하여 실행된다. 미니소버를 이용한 실험은 흡수과정동안의 기본적인 열 및 물질전달 특성을 확인하기 위하여 추천되는데, 흡수기, 디소버, 용액펌프 및 에어코일(aircoil)을 설치한 후, 흡수기와 디소버에 대한

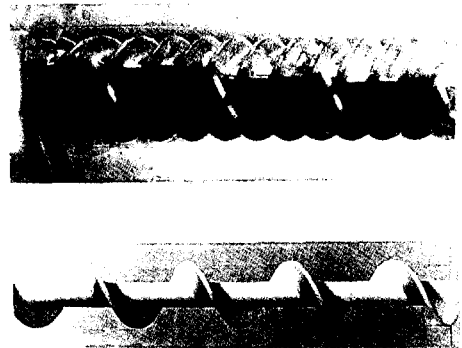


Fig.7 Visualization of flow patterns in an enhanced tube with an twisted insert

Table 8 Enhanced surfaces used in absorption heat pump systems

Enhanced surfaces	Components
Knurled surfaces	Absorber, Desorber, Rectifier
Fluted tubes	Precooler, Absorber, Desorber, Condenser, Evaporator, Rectifier
Perforated fins	Absorber, Desrober, Rectifier
Packed surfaces	Rectifier
Louvered fins	Aircoils
Offset strip fins	Condenser, Evaporator
Plate heat exchangers with fins	Absorber, Desorber, Condenser, Evaporator

여러 가지 형상의 열교환기를 시험한다. 브레드 보드나 프로토타입 실험의 경우, 열전달 특성, 역류현상 및 압력강하 등의 문제들을 확인한 후, 부품설계과정에서 결정된 모든 요소들을 설치하고 연결한다. 실험적 검증과정 동안 사이클 모델링 과정에서 결정된 온도, 압력, 유량 및 농도들을 얻도록 시스템을 조절하여 시스템의 실제 COP와 용량을 실험결과로부터 결정한다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 흡수기와 디소버간의 온도중첩을 늘리도록 하는 것과, 디소버 컬럼내의 액류위치를 조절하여, GFD내의 모든 전열면이 액류에 의해 완전히 접촉되도록 하여, 내부에서 고온으로 인한 부식과 산화를 방지하도록 하는 것이다. 액류의 위치는 GAX 시스템의 단열 분해기(adiabatic analyzer) 하단부정도로 유지하는 것이 적당하다.

7. 기술적 문제점들

본 장에서는 암모니아-물 흡수식 시스템에서 중요하게 여겨지는 다음의 기술적인 문제점들을 소개하고, 가능한 해결책과 의견들을 제시하고자 한다.

- ① 용액펌프(solution pump)
- ② 부식 및 안정성(corrosion and stability)

- ③ 냉각수의 선택(selection of hydronic fluid)
- ④ 표면처리(surface treatment)
- ⑤ 암모니아 농도측정법(concentration measurement)
- ⑥ 차세대 흡수식 작동유체(advanced absorption fluid)

7.1 용액펌프(solution pump)

암모니아-물 흡수식 시스템에서 용액펌프는 기술적으로 가장 문제가 되는 심장부이다. 리스트릭터(restrictor)와 용액펌프를 제외한 모든 요소들이 열교환기로서의 역할을 하지만, 용액펌프는 시스템의 요소들 중에서 유일하게 다이어프램 등(diaphragm) 동적인 부품들(moving part) 지니고 있다. 이로 인하여 암모니아-물의 흡수식 시스템에서 발생하는 많은 문제들이 용액펌프로부터 시작된다. Table 9에 현재 사용되고 있는 여러 종류의 용액펌프들이 각각의 문제점들과 함께 정리되어 있다. 다이어프램 방식의 경우, 가격면에서 이점이 있으나 종종 다이어프램 자체가 급격한 압력의 변동으로 인하여 파열되는 문제점을 가지고 있다. 스크루(screw) 방식의 경우 다이어프램 방식에 비하여 일정한 양의 용액을 송출하는 이점이 있으나, 마모에 대비한 특별한 재질이나 표면의 특수처리가 요구되므로 가격이 비

Table 9 Characteristics of each type of solution pump in ammonia-water systems

Types	Characteristics	Problems and comments
Diaphragm pump	Three moving parts : • Inlet check valve • outlet check valve • Teflon diaphragm Has O-rings Fluctuating mass flow rate	Have worked well for over 25 years Majority of the problems • O-rings develop leaks • Check valve act up due to debris • Diaphragm rupture Cheap : ~ \$ 200 per unit
Gear pump	Steady mass flow rate	Can be used in GAX system Price and durability not checked
Screw type	Steady mass flow rate	Too expensive \$ 2,000 per unit Wear and friction problems Not good for commercial

싼 문제점이 있다. 소수의 연구기관에서 채용되고 있는 기어(gear) 방식은 역시 일정한 양의 용액을 송출하나 가격과 내구성 면에서의 타당성이 검증되지 않은 상태이다. 용액펌프에서는 마모나 부식에 의한 파편이 결정적으로 성능을 좌우하므로 특별한 주의가 요구된다. 결론적으로 본 연구에서는 다이아프램의 재질을 개선하여 파열을 방지하는 방법과 제작비 면에서 경쟁력이 있는(단가가 \$300 이하의) 새로운 방식의 용액 펌프를 개발하는 것이 추천된다.

## 7.2 부식 및 안정성(corrosion and stability)

냉동공조 분야에서는 제품의 성능(COP), 크기(size) 그리고 비용(manufacturing and operating costs)의 세 가지 중요한 요소가 있는데, 이 중 성능과 비용은 부식과 안전성에 밀접하게 관계된다. 제작비를 감소시키기 위하여 대부분의 요소들은 탄소강(carbon steel) 등 저가의 재질로 만들어지는 것이 바람직하나, 재질에 따른 부식은 제품의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 수소와 같은 비응축 가스(noncondensable gas)가 발생되어 제품의 수명을 단축시키는 결과를 초래한

다. 부식 방지제(corrosion inhibitor)로써 소듐 크로메이트(sodium chromate)가 약 2% 이하의 농도로 암모니아-물의 시스템에 가장 널리 사용되고 있다. Table 10에 미국 Trane 회사에 의해 얻어진 암모니아-물 시스템에 대한 부식시험결과가 제시되어 있다(Hindin and Agrawal<sup>(30)</sup>).

근래 미국의 일부 지역에서는 크로메이트 혼합물의 사용을 금지하거나 규제하는 법률들이 입안되고 있는바, 캘리포니아(California) 주에서는 수년 내에 냉동공조기에서 크로메이트 혼합물의 사용을 없애도록 요구하고 있다. 이에 따라 미국 가스연구소(Gas Research Institute, GRI)와 에너지부(Department of Energy, DOE)에서는 냉동공조 응용기기에서 크로메이트 혼합물을 대신할 부식방지제를 개발하기 위하여 여러 기관에 연구를 위탁하여 왔다. 그 결과로서 소듐 실리케이트(sodium silicate)와 소듐 징케이트(sodium zincate)가 암모니아-물의 시스템에 유망한 대체 부식방지제로서 연구되어 왔으나, 최근에 실리케이트 혼합물은 비응축 가스를 생성하고, 피로부식(stress corrosion)에 의한 균열을 일으키는 것이 밝혀졌다. 이러한 문제점들의 주요 원인으로

Table 10 Summary of corrosion/stability testing in ammonia-water systems

Temperatures		325°F (163°C)		375°F (190.6°C)		425°F (218.3°C)	
Metal	Phase	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O LiBr	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O LiBr	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> H <sub>2</sub> O LiBr
1,020 CS	Liquid	AC	AC	AC	AC	PAC	PAC
	Vapor	AC	AC	UAC	UAC	UAC	UAC
316 SS	Liquid	AC	AC	AC	AC	AC	PAC
	Vapor	AC	AC	PAC	PAC	UAC	UAC
35 Titanium	Liquid	AC	AC	AC	AC	AC	AC
	Vapor	AC	AC	AC	AC	PAC	PAC

AC : Acceptable

UAC : Unacceptable

PAC : Probably Acceptable



는 시스템내부의 여러 지역에서(특히 암모니아 농도가 높은 곳) 실리케이트의 용해도가 낮기 때문인 것으로 밝혀졌다. 따라서 시스템내부의 각 부분에서 실리케이트의 용해도를 높이면 실리케이트 혼합물의 부식방지제는 크로메이트 혼합물의 대체물로서 아직 그 가능성이 남아있는 것으로 알려져 있다(Hindin and Agrawal<sup>(30)</sup>).

요약하면, GAX 사이클에서 암모니아에 의한 부식문제는 열전달 표면이 고온의 기류에 노출되었을 때 발생하므로 열전달 표면이 액류로 완전히 적셔지도록 열교환기들을 설계하여야 한다. 특별히 시스템 내부중 가장 고온의 기류가(약 210°C) 존재하는 GFD는 풀 보일링(pool boiling) 방식이나, 기포방식의 열전달 모드를 취하여 벽면이 기류에 오랫동안 노출되는 것을 방지하는 것이 강력하게 추천된다.

7.3 냉각수의 선택(selection of hydronic fluid)

냉각수의 선택은 열전달능력, 압력강하, 부식 및 환경문제 등을 고려한 후 결정한다. 본장에서는 제품의 경량화 및 소형화를 위하여 허용된 압력강하 내에서 최대의 열전달 능력을 제공하는 냉각수를 선택하는 방법을 제시하였다. 실제로 사용되고 있는 여러 가지 냉각수들을 열적 및 물리적 성질들을 고려한 후, 여러 대표적인 외기 온도에(14F(-10°C), 47F(8.3°C), 68F(20°C), 95F(35°C) 및 110F(43.3°C) 대하여 각각의 냉각수들을 비교하였다. Table 11에 고찰된 냉각수들과 각각의 냉각수 농도들이 나타나 있다. 여기

서 타당성 있는 비교를 위하여 각 냉각수들의 농도는 -15°C를 빙점(freezing point)으로 하는 값으로 취하였다. 결정된 농도에 기초하여 Table 12에 각각의 냉각수에 대한 비교결과가 제1열로부터 밀도, 비열, 동점성계수, 열전도계수, 열전달지수(열 전달계수), 압력강하지수 및 선택지수의 순으로 제시되어 있다. 각 냉각수의 열전달계수는 동일한 동관에 대하여 다음의 Dittus-Boelter의 관계식으로부터 계산하였다.

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{1/3} \tag{2}$$

위의 관계식으로부터 열전달지수,  $F_a$ 는 다음의 식으로 표시된다.

$$F_a = 0.023k^{2/3}(\rho c_p)^{1/3}(\mu/\rho)^{(1/3-0.8)} \tag{3}$$

여기서  $k$ 는 열 전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열,  $\mu$ 는 동 점성계수를 의미한다. 열전달 능력은 위의 열전달지수에 비례하게 되므로, 가능한 큰 값을 갖도록 선택한다. 다음은 압력 강하식을 고려한 후, 다음의 압력강하지수,  $F_{\Delta P}$ 를 다음과 같이 도입하였다.

$$F_{\Delta P} = 0.092\rho(\mu/\rho)^{0.2} \tag{4}$$

여기서 가장 바람직한 냉각수를 선택하기 위하여, 선택지수,  $F_{\Delta P}/F_a$ 를 고려하였다. 실제의 경우, 허용된 압력강하 내에서 최대의 열전달 능력을 제공하기 위하여, 위의 선택지수는 작은 값을 취하는 것이 바람직하다. Table 12의 결과에 나타나 있듯이, 고온에서는 물이 에틸렌 글라이콜(ethylene glycol)보다 좋은 결과를 주지만, 보다 넓은 외기온도 영역에서의 적용을 위하여는 에틸렌 글라이콜의 사용이 바람직한 것으로 추천된다.

7.4 표면처리(surface treatment)

시스템의 제작 및 설치시 오일 등의 이물질이 벽면에 부착되면 제품의 성능에 심대한 영향을 초래하므로, 다음의 표면처리 과정을 통하여 열전달 표면의 액류 접촉율(wettability)을 극대화하도록 적극 추천된다.

- ① 각 요소들을 부품설계 결과에 기초하여 조

Table 11 Various hydronic fluids and their freezing concentrations at -15°C

Coolant	Symbol	Concentration (%)
Ethylene Glycol	EG	30.5
Propylene Glycol	PG	33.0
Potassium Carbonate	PC	27.0
Potassium Acetate	PAC	23.0
Water	H <sub>2</sub> O	N/A
Calcium Chloride	CaCl <sub>2</sub>	18.0
Sodium Chloride	NaCl	18.0

Table 12 Comparisons of hydronic fluids for various temperatures

Coolant	T (°F)	$\rho$ lbm/ft <sup>3</sup>	$c_p$ Btu/lbmF	$\mu$ lbm/ft-h	k Btu/ft <sup>2</sup> hF	$F_a$	$F_{AP}$	ratio
EG	14	65.900	0.850	4.800	0.240	0.12	3.59	31.113
PG	14	65.100	0.884	14.043	0.229	0.07	4.41	64.813
PC	14	78.769	0.727	6.285	0.328	0.14	4.37	31.854
CaCl <sub>2</sub>	14	72.970	0.745	10.886	0.306	0.10	4.59	47.728
NaCl	14	71.414	0.815	8.951	0.260	0.10	4.34	45.318
EG	47	65.400	0.871	2.980	0.258	0.15	3.24	21.402
PG	47	64.743	0.890	5.800	0.232	0.10	3.68	35.554
PAC	47	66.800	0.670	6.290	0.269	0.10	3.83	37.380
PC	47	78.849	0.725	7.988	0.320	0.12	4.59	38.031
H <sub>2</sub> O	47	62.410	1.001	3.335	0.330	0.17	3.20	18.691
CaCl <sub>2</sub>	47	72.510	0.758	5.322	0.321	0.14	3.96	28.524
NaCl	47	70.800	0.821	5.564	0.275	0.12	3.92	31.719
PC	68	78.636	0.730	5.443	0.331	0.15	4.24	28.727
EG	95	64.771	0.888	1.446	0.256	0.21	2.79	13.199
PG	95	63.972	0.922	2.060	0.258	0.18	2.96	16.420
PAC	95	66.800	0.670	6.290	0.293	0.11	3.83	35.309
H <sub>2</sub> O	95	62.050	0.999	1.745	0.360	0.24	2.79	11.460
EG	110	64.530	0.894	1.356	0.280	0.23	2.74	11.885
PG	110	63.640	0.927	1.612	0.262	0.20	2.81	13.775
PAC	110	66.800	0.675	6.290	0.300	0.11	3.83	34.672
H <sub>2</sub> O	110	61.860	0.999	1.486	0.367	0.27	2.70	10.165

Where

T : °C = (F - 32)/1.8,  $\rho$  : kg/m<sup>3</sup> = lbm/ft<sup>3</sup> \* 16.0185,  $c_p$  : kJ/kgK = Btu/lbmF \* 4.1868, $\mu$  : Ns/m<sup>2</sup> = Btu/ft-h \* 4.13389 \* 10<sup>-4</sup>, k : W/mK = Btu/ft<sup>2</sup>hF \* 1.7303

립한다.

- ② 각 요소들을 사이클 구성도에 기초하여 연결한다.
- ③ 각 요소 및 연결된 제품들을 약 450°C에서 약 4시간동안 오일(oil)이 제거된 건기(dry Air)를 통하여 굽는다.
- ④ 제품에서 공기를 빼낸 후, 시스템 내부에 공기나 오일이 유입되지 않도록 시스템을 밀폐한 후, 용액을 유입한다.

7.5 암모니아 농도측정법(concentration measurement)

암모니아 농도측정법으로 여러 가지 방법들이 있으나, 일반적으로 액류의 적정법(titration)이 사용되는데 액류의 농도를 0.1% 오차 내에서 측정이 가능하다. 그러나 적정법은 0.01% 오차 내로 기류의 농도를 측정하는 데는 부적합하다. 기류의 농도를 측정하기 위하여는 응축법(condensation) 등의 특별한 방법이 요구되나, 실제로 암모니아-물의 GAX 시스템에서 기류의 농도는 포화지점에서의 평형조건으로부터 계산하는 것이 추천된다. 따라서 본 논문에서는 액류의 농도 측정법에 대하여만 다음의 순서에 준하여 기술하고자 한다.

- ① 약 50ml의 포화 붕산(boric acid)을 시험 플라스크(sampling flask)에 넣은 후, 약 1.5g의 결정 붕산을(crystalline boric acid) 첨가한다.
- ② 붕산이 포함된 플라스크의 무게를 스톱퍼를(stopper) 포함하여 측정한다.
- ③ 암모니아 샘플(sample)을 시스템으로부터 채취한다. 샘플의 적정을 위하여 45 내지 50ml의 1.0N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>을 준비한다.
- ④ 채취된 암모니아 용액의 양을 알기 위하여 프레스크의 무게를 다시 잰다.
- ⑤ 필터 튜브와 (filler tube) 필터튜브 스톱퍼를 증류수로 주의 깊게 씻어낸다.
- ⑥ 준비된 1.0N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 중화점(endpoint) 이를 때까지 천천히 적정한다. 적정시 용액이 완전히 혼합되게 하기 위하여 스테러(stirrer)를 이용하여 씻어준다.

- ⑦ 적정에 사용된 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 부피를 기록한다.
- ⑧ 사용된 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 그램상당량(gram equivalent)을 다음의 식을 통하여 계산한다.

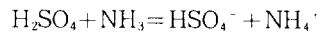
$$\text{Gram Equivalent} = (\text{Total ml of H}_2\text{SO}_4 \times \text{Normality}) / 1,000$$

평형상태에서는 황산의 그램상당량과 붕스 이온의 그램상당량은 동일하며, 또한 붕스의 그램상당량은 암모니아의 그램상당량과 동일하다.

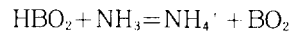
- ⑨ 따라서 미지의 용액 샘플중의 암모니아 백분율을 다음의 식으로부터 계산한다.

$$\text{Weight \%} = (\text{Gram Equivalent}) \times (\text{Molecular Weight of NH}_3) / (\text{Sample Weight})$$

평형점에서의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> :



평형점에서의 HBO<sub>2</sub> :



적정전의 준비사항으로는 다음의 것들이 있다.

붕산측 : 결정 붕산 16g

증류수 500ml

4% 브로모크레솔 녹색 용액

(Bromocresol Green Solution)

황산측 : 1.0N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(27.47 ml Conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in 1,000 ml H<sub>2</sub>O)

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

경우에 따라서 암모니아 샘플에는 Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 또는 NaOH가 포함되어 있다. 이 경우에는 다음의 식을 이용하여 실제 농도치를 보정한다.

실 NH<sub>3</sub> Weight %

$$= \text{Weight \%} - [(\text{Weight \% Na}_2\text{CrO}_4) / 162 - (\text{Weight \% NaOH}) / 40] \times 17.036$$

7.6 차세대 흡수식 작동유체

(advanced absorption fluid)

현재 Trane, Carrier, Phillips Engineering, 그리고 ORNL/DOE에 의하여 터너리(ternary) 또는 쿼터너리(quarterary) 암모니아 혼합용액

이 시스템의 성능을 높이기 위하여 개발되고 있다(Reiner and Zaltash<sup>(31)</sup>). 이들의 연구결과에 의하면, 암모니아-물의 혼합액에 염(salt)를 첨가하면 흡수기와 디소버간의 온도중첩이 증가하여 시스템의 성능이 향상되나, 재질의 부식문제가 급속히 증가하는 것으로 밝혀졌다. 최근에는 ORNL/DOE에서 "Q2"라 불리는 새로운 쿼터너리 암모니아 혼합용액이 부식시험을 거친 후 개발되었는데, GAX의 온도범위 내에서 암모니아-물의 바이너리(binary) 용액보다 부식성이 훨씬 감소되는 것으로 보고되었다(Fiskum 등<sup>(9)</sup>).

## 8. 결론 및 제언

본 연구에서는 암모니아-물 흡수식 열펌프의 개발을 위하여, 현재 미국에서 개발되고 있는 흡수식 기술들을 조사 분석하였는바, 다음의 결론 및 제언들로 본 연구를 마무리하고자 한다.

### (1) 사이클 모델링

반 수냉식 GAX 사이클(GAX cycle with a hydronic circuit)이 실내로의 암모니아 유입을 차단할 수 있고, 실외기에서 순환펌프가 필요치 않게 되므로, 경제성과 안전성 면에서 가정용 및 소형 상업용 열펌프로서 가장 바람직한 사이클로 판단된다. 하이브리드 GAX 사이클은 냉동 및 냉난방에 모두 응용될 수 있도록 한 진보된 혼합 사이클로 판넬 GAX 사이클과 함께 고성능, 소형경량화 및 에너지의 효율적 회수관점에서 차세대 흡수식 시스템으로 추천된다. 특히 판넬 GAX 사이클은 한국의 온돌방식의 난방시스템에도 응용될 수 있는 시스템으로 앞으로의 연구대상이다.

### (2) 부품설계 및 유동의 가시화

본 연구에서는 암모니아-물의 시스템에 대하여, 열 및 물질전달을 동시에 고려한 부품설계 방법을 제시하였다. 위의 일반화된 설계방법은 GAX 사이클을 구성하는 모든 열교환기들에 대하여 적용될 수 있다. 박막 및 기포방식 등의 효율적인 흡수기 형상들을 비교하였고, 제품의 소

형 경량화를 위하여 이들 방식들에 확장된 열전달 면들을 사용하는 것이 추천되었다. 특별히 응용판열교환기(modified plate heat exchanger)의 사용이 적극적으로 추천되었다. 유동의 가시화 또한 열교환기 내부의 열 및 물질전달 특성을 파악하기 위하여 반드시 요구되며, 가시화과정을 통하여 액류의 역류현상을 방지하여야 한다.

### (3) 성능 및 제품의 크기

GAX 사이클은 열펌프의 형태로(냉방 및 난방용), 가정용 및 소형상업용(3-10RT)으로 추천된다. 기존의 전기구동식 열펌프에 경쟁력을 갖기 위하여 버너 효율을 고려한 실제량을 기준으로 목표치로서 높이 950mm, 폭 960mm, 그리고 너비 500mm 등이 경제성을 고려하여 타당한 것으로 평가된다.

### (4) 시장성 및 가격

현재 미국에서는 냉동톤당 \$1,500의 최종소비자 가격으로 공조시장의 50%까지 점유할 수 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 최종 소비자 가격으로 냉동 톤당 최대 \$1,250을 적당한 가격으로 제시하고자 한다. 위의 목표치로 일본 및 한국을 포함하는 대부분의 아시아국가에서 기존의 전기구동식 에어컨에 충분한 경쟁력이 있는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 저자는 여러 가지 기술적 제안과 자료를 제공해준 Dr. R. N. Christensen(OSU), Dr. D. J. Lee(LG Electronics Inc.), Mr. J. Marsala(ATC), Dr. W. Ryan(GRI) 그리고 Mr. R. DeVault(ORNL/DOE) 등에게 감사를 표한다. 또한 논문 작성에 조언을 준 서울대학교 노승탁, 김민수 교수님께 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. Suzuki, N., K. Watanabe, T. Uchida, O. Hoshii, M. Fujiwara, H. Izawa, A. Akisawa, and T. Kashiwagi, 1996, "Case

- study on DHC system incorporating advanced absorption heat pumps," *Proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 2, pp. 753-758, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
2. Furutera, M., T. Origane, T. Sawada, Y. Kunugi, T. Kashiwagi, T. Takei, M. Aizawa and H. Mori, 1996, "Advanced absorption heat pump cycles," *Proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 1, pp. 109-119, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
  3. Kashiwagi, T., A. Akisawa, Y.T. Kang, and B. Saha, 1997, "Next generation technologies for advanced energy conversion system," *Proceedings of IAMS International Seminar on Thermal and Fluid Engineering for Advanced Energy System*, pp. 1-12, July 23-24, 1997, Kyushu University, Kasuga, Japan.
  4. Kang, Y.T., R. Stout and R. N. Christensen, 1997a, "The effects of inclination angle on flooding in a helically fluted tube with a twisted insert," In press, *International Journal of Multiphase Flow*,
  5. Kang, Y.T., R. Stout and R. N. Christensen, 1997b, "Experimental investigation on flooding in a fluted tube with and without a twisted insert," *ASME, Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 4, No. 2, pp. 111-129.
  6. Kahn, R., H. Hugo and G. Alefeld, 1996, "Results and perspective of an ammonia-water cycle with high temperature lift using reversing rectification," *Proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 2, pp. 669-678, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
  7. Kalina, A.I., 1984, "Combined cycle system with novel bottoming cycle," *ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 737-742.
  8. Ryan, W., 1996, Personal communications.
  9. Fiskum, R.J., P. Welesko Adcock, and R.C. DeVault, 1996, "United State Department of Energy, Thermally Activated Heat Pump Program," *Proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 1, pp. 101-107, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
  10. Merrill, T., 1996, Personal communications.
  11. Phillips, B., 1996, Personal communications.
  12. Petty, S., 1996, Personal communications.
  13. Hanna, W., 1996, Personal communications.
  14. Erickson, D., 1996, Personal communications.
  15. Hemmelgarn, S., 1996, Personal communications.
  16. Marsala, J., 1996, Personal communications.
  17. Plazac, B., 1996, Personal communications.
  18. Halbig, R., 1996, Personal communications.
  19. Modahl, R. and F. Hayes, 1992, "Development and proof testing of advanced absorption refrigeration cycle concepts," ORNL/Sub/86-17498/1. Oak Ridge, TN.
  20. Phillips, B. A., 1990, "Development of a high-efficiency, gas fired absorption heat pump for residential and small-commercial applications," Phase I final report, Report prepared by Phillips Engineering Company for Oak Ridge National Laboratory.
  21. Garimella, S., R. N. Christensen, and D. Lacy, 1996, "Performance evaluation of a Generator-Absorber heat-exchange heat pump," *Applied Thermal Eneginnering*, Vol.

- 16, No. 7, pp. 591-604.
22. Herold, K.E., X. He, D.C. Erickson and M. V. Rane, 1991, "The branched GAX absorption heat pump cycle," *Proceedings of Absorption Heat Pump Conference*, Tokyo, September 30, 1991, pp. 127-132.
23. Erickson, D. and J. Tang, 1996, "Evaluation of double-lift cycles for waste heat powered refrigeration," *proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 1, pp. 161-168, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
24. Erickson, D. and G. Anand, 1996, "VX GAX cycle development," *Proceedings of The International Ab-Sorption Heat Pump Conference '96*, Vol. 2, pp. 805-815, September 17-20, 1996, Montreal, Canada.
25. kang, Y.T, R. N. Christensen, T. Kashiwagi, 1997c, "Ammonia-Water Bubble Absorber with a Plate Heat Exchanger," In press, *ASHRAE Transaction*, Vol. 104.
26. Kang, Y.T., A. Akisawa and T. Kashiwagi, 1997d, "Analytical investigation of two different absorption modes: Falling film and Bubble types," Submitted in *International Journal of Refrigeration*.
27. Kang, Y.T., W. Chen and R. N. Christensen, 1997c, "A Generalized Design Model by Combined Heat and mass Transfer Analysis in  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  Absorption Heat Pump systems," In press, *ASHRAE Transaction*, Vol. 103(1).
28. Kang, Y.T., A. Akisawa, T. Kashiwagi, 1997f, "Experimental investigation of falling film absorption of  $\text{N}_3\text{H-HO}_2$  in a plate heat exchanger," Submitted in *International Heat Transfer Conference*, KyungJoo, Korea, August 23-28, 1998.
29. Kang, Y.T., W. Chen and R. N. Christensen, 1996, "Design of Ammonia-Water Condenser with a Fluted Tube," In press, *ASHRAE Transaction*, Vol. 102(2), pp. 587-595.
30. Hindin, B. and A.K. Agrawal, 1995, "Evaluation of alternative corrosion inhibitors for gasfired ammonia-water refrigeration machines," Final Report No. GRI-95/0075.
31. Reiner, R.H. and A. Zaltash, 1992, "Corrosion screening of potential fluids for ammonia/water absorption cycles," ORNL/CF-92/41, February, 1992.