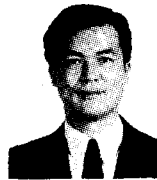


미국 및 일본의 차세대 흡수식 열펌프 기술(2) - 일본의 차세대 흡수식 연구동향 -

Next generation absorption technologies in USA and Japan(2) - Next generation technologies in Japan -

강 용 태
Y. T. Kang

동경농공대학 공학부 기계시스템공학과



- 1965년생
- 공기조화 및 냉동에 관련한 비등열전달을 전공하였으며, 흡수식 열펌프, 열교환기설계, 환경친화형 에너지캐스케이드 및 제로에미션시스템개발 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

가스구동 흡수식 시스템은 인류와 환경에 여러 가지 유익을 가져다 준다. 첫째, 시스템의 고효율에 따른 매력적인 경제성을 제공하고, 둘째 천연가스의 사용으로 인하여 여름철 피크 전력소요(peak electric demand)를 완화하고, 셋째 이산화탄소(CO₂)의 발생을 감소시킴으로써 지구온난화 현상을 완화한다. 실제로 가스구동 흡수식 시스템으로부터의 CO₂ 발생량은 증기보일러를 사용하는 전기구동 냉동기에 비하여 85% 수준인 것으로 보고되었다(Suzuki 등)¹⁾. 네째로 암모니아 및 물과 같은 환경친화적인 냉매들을 사용함으로써 오존층을 파괴하는 Chlorofluorocarbon(CFC) 및 Hydrochlorofluorocarbon(FCFC)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 원인중의 하나로 밝혀짐에 따라서 1997년 교토의정서에 의해서 사용금지가 국제적으로 합의되었다. 이들을 대체하기 위하여 여러 연구들이 진행되어온 바, 환경친

화적 자연냉매를 사용하는 열구동 흡수식시스템이 가정용과 소형 상업용(암모니아-물 시스템) 및 대형 산업용(리튬브로마이드-물 시스템)에서 각광을 받고 있다. 특히 근래에는 소형열구동 흡수식시스템이 가정용에어콘에 대비하여 차세대 환경친화적 냉난방시스템으로 주목을 받고있는 바, 박막유동 및 기포타입유동 등의 효율적인 열전달 모드를 적용함으로써 제품의 소형화를 이루고 있는 것으로 보고되고 있다(Kang 등^{2), 3)}.

본 연구는 미국과 일본의 차세대 흡수식 열펌프기술의 연속물로, 전편에서는(강용태⁴⁾) 미국에서의 흡수식 연구개발동향, 마케팅 조사결과, 새로운 흡수식 기술, GAX(generator absorber heat exchange) 사이클 및 여러 가지 기술적 문제점들을 소개하였다. 본 편에서는 일본에서의 암모니아-물 및 물-리튬브로마이드 흡수식 사이클의 연구개발동향, 차세대 흡수식 사이클, 첨가제에 의한 마란고니대류(marangoni convection) 및 차세대 흡수식 용액 등, 현재 개발중인 여러 가지 기술적 연구결과들을 소개하여, 이를 바탕으로 한국의 기후, 시장, 공간의 조건하에서 가장 효율적이고 바람직한 연구개발 방향을 제시함을 목적으로 한다.

2. 용어정의 및 흡수식 사이클의 분류

흡수식에서 사용되는 대표적인 용어들을 표 1에 정의하였다. 효용수(number of effect)는 냉매증기의 발생수로 정의되는데, 보다 구체적으로는 1 단위의 열유니트가 발생기에 투입되었을 때, 증발기에서(냉방모드의 경우) 얻을 수 있는 냉방효능의 열 유니트수를 의미한다. 원수(number of solution pair)는 전체 사이클중 서로 섞이지 않는 흡수용액의 수를 의미한다. 단수(number of stage)는 증발기와 흡수기세트로 구성되는 용액서쿠트(solution circuit)의 수로 정의 되는데, 하나의 증발기에 대하여 다수의 흡수기가 다수의 세트로 구성되는 경우는 흡수기의 수에 해당하는 다단사이클로 구분된다. 농용액(strong solution) 및 희용액(weak solution)은 각각 냉매의 농도가 높은 경우와 낮은 경우로 정의된다. 위의 정의는 물-리튬브로마이드의 경우, 일반적으로 산업현장에서 사용되는 정의와 반대이다. 즉 산업현장에서는 리튬브로마이드의 농도가 높은 경우를 농용액으로 사용되는 경우도 있으나, 여러 흡수사이클에서의 학문적 일관성을 위하여 본 소고에서 정의된 대로 사용하는 것이 바람직한 방향으로 여겨진다.

물론 암모니아-물 시스템에서는 암모니아의 농도가 높은 용액이 농용액으로 정의되어 혼동의 여지가 없다. 이는 암모니아-물의 경우 암모니아가 냉매이며, 물-리튬브로마이드의 경우 물이 냉매이기 때문이다. 온도 리프트(temperature lift)는 배열 온도(heat rejection temperature)와 증발온도(evaporation temperature) 간의 온도차로 정의되는 바, 산업배열이용 사이클 또는 저온사이클 등에서 주로 사용되는 용어이다. 리흡션(resorption) 사이클은 발생기에서 발생된 냉매증기가 응축기를 경유하지 않고 직접 흡수기로 유입되어 흡수되는 사이클로 정의 되는 바, 응용목적에 따라 성능 향상사이클 또는 온도 리프트 사이클에 모두 적용된다. 캐스케이드(cascade)는 열에너지를 온도레벨에 따라서 손실없이 이용하기 위하여 서로 연결된 사이클의 의미한다. 하이브리드 사이클은 성능 향상 또는 저온의 증발온도를 얻기위하여 흡수사이클에 압축기를 합성한 혼합사이클을 의미한다.

고성능 흡수식 열펌프 사이클은 표 2에 나타난 바와 같이 그 이용목적에 따라 성능향상(performance enhancement) 그룹, 온도 리프트 증가(temperature lift enhancement) 그룹, 응축압력 하강, 동력발생 및 용액수송사이클 등 크게 네

표 1 흡수식 용어 정의

Terminology	Definition
Number of effect	Number of refrigerant generation processes
Number of stage	Number of solution circuits for an evaporator/absorber set
Number of solution pair	Number of different solution pairs that are not mixed each other
Basic cycle	Single stage cycle
Exchange unit	Heat exchanger for heat and mass transfer with phase change
Strong solution	Rich in refrigerant
Weak solution	Poor in refrigerant
Temperature lift	Difference between heat rejection temperature and evaporation temperature
Resorption	Dual cycle where the refrigerant generated from the low temperature generator is directly absorbed in the high temperature absorber without condensation process
Cascade	Cycle assembly coupled by heat transfer only
Hybrid	A cycle combined absorption and compression processes

표 2 흡수식사이클의 분류

Primary purpose	Heat recovery	One solution pair			Two solution pairs	Three solution pairs
		One stage	Two stage	Three stage	Two stage	Three stage
Performance improvement	Absorption heat recovery	GAX RA	Double effect Semi GAX Advanced RA	Triple		
	Condensation heat recovery	Double effect Triple effect Quadruple Sextuple	Triple effect		Double	
	Abs./Cond. heat recovery			Resorption	Triple Dual Triple Quadruple Quintuple Sextuple	Triple Seven
	Evaporation heat enhancement	Supplemental refrigerant cycle	Resorption (I)			
	Others			Type III		
Temperature lift enhancement		SRATA	Two stage Absorption Resorption			
	Heating and cooling modes					
Condenser pressure reduction			Resorption (II)			
Power generation	Waste heat	CAT CATR				
Solution transport		STA				

그룹으로 분류된다. 성능향상그룹은 다시 열회수 방법에 따라 흡수열회수, 응축열회수, 흡수/응축열회수, 증발열 확대 및 기타로 구분된다. 삼원 삼단 칠중효용 사이클은 현재까지 개발된 흡수사이클 중 가장 고효용 사이클로 R. DeVault⁵⁾에 의하여 1989년에 개발되었다. 동력발생 사이클로는 흡수 및 동력발생사이클의 혼합사이클로 가스터빈장치

의 배열이용 사이클(waste heat), 흡수발전 혼합 사이클(combined absorption and power generation) 및 흡수발전냉동 혼합(combined absorption, power generation and refrigeration) 사이클 등이 있다. 위의 고성능 흡수사이클들의 특성은 Kang 등⁶⁾과 Kunugi 등⁷⁾에 구체적으로 설명되어져 있다.

3. 일본의 흡수식 개발현황

본 장에서는 현재까지 일본에서 개발된 소형 및 대형흡수식 냉동기 및 열펌프를 소개한다. 먼저 가정용 소형의 흡수식시스템을 프로젝트단위로 설명하고, 대형 흡수식시스템을 각 회사별로 설명한다.

3.1 가정용 소형흡수식 시스템

일본의 소형흡수식 연구는 표 3에 정리된 바와 같이 기본적으로 네그룹에서 연구되고 있다. 즉 일본 가스협의회(Japan gas association) 주관 그룹, MITI(ministry of international trade and industry) 주관그룹, LPG R&D 센터 주관 그룹 그리고 PEC(petroleum energy center) 주관그룹 이다. 각 주관그룹별로 구성회원과 프로젝트 진행상황이 표 3의 제 2열 및 3열에 정리되어 있다. 각 그룹별로 암모니아-물과 물-리튬브로마이드 시스템을 모두 연구하고 있는 바, 암모

니아-물 시스템은 단효용 및 GAX 시스템위주로 개발되고 있고, 물-리튬브로마이드 시스템에서는 공냉식흡수 시스템이 개발되고 있다. 삼중효용 사이클은 가정용보다는 큰 중대형 (20 RT 이상)으로 Ebara 및 Hitachi Zosen에서 개발되고 있다. 표 4에 현재 JGA 그룹에서 설정한 가정용가스구동 열펌프시스템의 목표치들이 정리되어있다. 미국의 목표치들과 비교하여 성능목표치면에서는 냉방 (약 COPc=0.7) 및 난방 (약 COPh=1.4)의 경우 모두 동일하다. 냉동능력면에서는 가정용으로 일본의 경우 2RT 이하, 미국의 경우 3~5RT로 일본에서는 공간제한문제로 인하여 미국의 가정용냉방능력 보다 작게 설정되어있다. 설치면적은 경쟁력을 위하여 전기구동식 에어컨과 동일하게 설정되었고, 다만 높이가 전기구동식의 약 1.5배 이내로 유지하도록 목표치를 설정하였다. 라이프 스펠(life span)의 경우 전기구동식 에어컨보다 (약 25년) 흡수식이 짧은데(약 15년), 이는 흡수식장치내의 부식문제에 주로 기인한다. 따라서

표 3 일본의 흡수식 연구 그룹

Funding Group	Members	Comments
JGA (Japan Gas Association)	NH ₃ -H ₂ O Matsushita/Osaka Gas Daikin	Developed single effect Developing GAX Heat pump Developing GAX chiller
	H ₂ O-LiBr Ebara	Triple effect
MITI/DEDO (Ministry of International Trade and Industry)	NH ₃ -H ₂ O Hitachi (HBE)	GAX chiller
	H ₂ O-LiBr Hitachi Ltd., Hitachi Zosen	Triple effect
	TFE/NMP Sanyo	Dual cycle double effect
LPG R&D center	NH ₃ -H ₂ O Katsura Seiki	GAX heat pump
	H ₂ O-LiBr Yazaki	Aircooled double effect
PEC (Petroleum Energy Center)	NH ₃ -H ₂ O Mitsubishi	Developing GAX chiller

표 4 가스구동 가정용흡수식 열펌프의 개발목표

Capacity	Cooling : 2.5~7.0 kW Heating : Larger than cooling mode
COP	Cooling : over 0.7 Heating : over 0.75 with boiler over 1.4 with GAX
Size	Install area : Same as the electricity driven mode Height : 1.5 times of the electricity driven mode
NOx and noise	NOx emission : 80 ppm Noise : Same as the electricity driven mode
Life	15 years

표 5 JGA 프로젝트의 연구개발개요

Sponsor	JGA	Theme		
Participants	Gas company a. Tokyo Gas b. Osaka Gas c. Toho Gas d. Saibu Gas Manufacturer : 11 companies	Systems	Companies	Capacity (kW)
		H ₂ O-LiBr Absorption	Yazaki	2.2 (1Rm)
			Yazaki	3.5 (1Rm)
			Ebara	7.0 (3Rm)
		NH ₃ -H ₂ O Absorption	Mitsubishi Elec.	7.0 (3Rm)
Daikin/Rinnai	7.0 (3Rm)			
Period	1992~1995 (4 years)	GHP	Yamaha	3.2 (1Rm)
			Sanyo/Honda	5.0 (2Rm)
			Yamma Diesel	6.7 (1Rm)
budget	3.3 Billion Yen (1/2 Governmental subsidy)	Vuillmier HP	Mitsubishi Elec.	3.0 (1Rm)
			Sanyo	4.0 (1Rm)

여러 가지 부식방지제(corrosion inhibitor)를 사용하여 부식에 의한 라이프 스펠의 단축문제를 해결하는 것이 요구되는 바, 현재 크로메이트계(Cr) 및 몰리브덴계(Mo) 등이 이러한 목적을 위하여 사용되고 있다. 표 5에 JGA 주관그룹의 구체적인 프로젝트 계획안이 정리되어 있다. Tokyo Gas 및 Osaka Gas를 비롯한 일본 가스회사와 11개의 제작회사가 주관하여 실용성 평가를 위한 연구가 1992년부터 1995년까지 4년간 진행되었고, 1996년부터 1998년까지 사업화를 위한 월드테스트를 수행하였다. 암모니아-물은 Matsushita와 Daikin/Rinai에서 연구를 수행하였고, 물-LiBr는 Taka-ki, Yazaki 및 Ebara 등에서 개별적으로 연구를 수행하였다. 표 6에 1998년 현재 Matsushita의

표 6 Matsushita GAX 프로젝트의 연구개발 상황

	Target values	Current status
Single effect cycle	COPc=0.5	COPc=0.5
	COPh=1.2	COPh=1.2
	Capacity=2.0RT	Capacity=2.0RT
GAX cycle	COPc=0.7	COPc=0.65
	COPh=1.45	COPh=~
	Capacity=2.0~3.0RT	Capacity=2.0~3.0RT

암모니아-물 GAX 프로젝트의 연구개발 결과가 정리되어있다. 단효용의 경우 COPc=0.5, COPh=1.2의 목표치를 이미 달성하였고, GAX의 경우도 COPc=0.7, COPh=1.45의 목표치에 근사하게 접

근하여 현재 최종마무리 실험단계에 있으나, 가격 문제로 인하여 상업화에 아직은 어려움을 겪고있는 실정이다. 표 7에 현재 일본에서 고려중인 가정용소형 흡수식시스템의 상업화 방안이 정리되어있다. 먼저 미국에서 개발된 DOE의 GAX 시스템을 도입하여 상업화하는 방안이 Hitachi를 중심으로 고려되었고, 일본 회사들의 자체개발로 상품화하는 방안이 Matsushita, Daikin 및 Mitsubishi를 중심으로 고려되었으나, 1998년말 현재 Matsushita만이 표 6에 정리된 결과를 얻으며 연구를 계속 수행중에 있다.

현재 일본에서 시판중인 암모니아-물 소형흡수식 냉동기는 주로 미국의 Serval사 제품이다. Katsura Seiki에서는 미국 Serval사의 암모니아 단효용 냉동기를(5 냉동톤) 수입하여, 보일러를 부가시켜 냉난방에 동시에 이용하도록 하였다. 또한 2 냉동톤의 저온용 냉동기도(-10℃의 냉수

온도) 판매를 하고 있다. 표 8에 1996년도부터 1998년도까지 일본에서 설치된 암모니아-물 소형흡수식냉동기가 조사되어있다(일본냉동설비 기술위원회⁸⁾). 1996년부터 1998년까지 3년동안 일본에서 가정용소형 단효용 암모니아-물 냉동기/히터가 총 288대가 설치되어 사용중인 것으로 조사되었다. Hitachi Building Engineering에서는 최근에 Serval사의 GAX 모델을 시판예정인데 냉방COP가 0.62로 비교적 낮은 편이다. 그러나 GAX 모델로는 최초로 제품화되어 미국과 일본에서 1999년 하반기부터 시판될 예정이다.

가정용소형 흡수식 시스템의 또다른 한 축으로 공냉식 물-LiBr 시스템이 최근들어 각광을 받고 있다. 공냉식의 경우 냉각탑의 설치가 불필요하여 소형화가 가능한 잇점이 있으나 대기온도에서의 결정화문제로 인하여 삼성분 또는 사성분의 혼합 LiBr 수용액을 새로운 흡수용액으로 개발하여 사

표 7 일본의 가정용 소형흡수식 시스템의 상업화방안

Possibilities	Status
A. DOE Manufacturing Partnership (GAX)	Hitachi : Considering Sanyo : Object Mitsubishi : Object
B. Japanese Manufacturers (GAX)	Matsushita Daikin Mitsubishi Expected to be on the market in 2~3 years
C. Refrigeration Applications	Tokyo Gas Food storage, Ice and ice-cream making To obtain -50℃ using NH ₃ Already on the market

표 8 최근 일본에서의 가정용 소형 암모니아 흡수식시스템 설치실적

Company	Katsura Seiki			Hitachi Building Engineering		
	Capacity		Total/year	Capacity		Total/year
Year	3RT	5RT		3RT	5RT	
1996	41	129	170	2	4	6
1997	10	7	17	11	17	28
1998	8	32	40	3	24	27
총 계	59	168	227	16	45	61

용하고 있다. 따라서 앞으로는 가정용 소형흡수식 시스템에서 기존의 물-암모니아 시스템과 새로운 관심대상인 공냉식 소형 물-LiBr 시스템이 경쟁적으로 연구될 것으로 예상된다.

3.2 대형 상업용 흡수식 시스템

암모니아-물의 증대형 흡수식냉동기는 저온분야에서 응용되는데, 주로 맥주제조공정, 화학프로세스냉각, 스케이트장, 및 냉동창고 등에 이용되고 있다. Hitachi Zosen 및 Daikin에서 주로 생산을 하는데, 표 9에 현재 일본에서 설치되어 사용되고 있는 증대형 암모니아-물 흡수식 냉동기들이 정리되어 있다. Hitachi Zosen에서는 20~150 냉동톤의 고압증기구동 및 도시가스구동 암모니아 흡수식 냉동기를 생산하는데, 폐열에 의한 구동도 가능하고 특히 판형열교환기를 사용하여 소형화 하였으며, 그에 따라 암모니아 충전량을 기존의 1/5이하로 감소시켰다. 냉동온도는 -13℃에서 -40℃까지 스케이트장(-13℃), 화학프로세스(-15℃) 및 냉동창고(-40℃) 등에 응용되고 있다. Daikin에서는 Hitachi Zosen보다는 대형쪽으로 생산하며, 주로 증기를 열원으로 사용하고 있다.

물-리튬브로마이드 대형의 경우, 많은 일본회사들이 여러형태의 모델들을 생산하며 경쟁을 하고 있다. Mitsubishi heavy industry에서는 100~1350 냉동톤의 단효용 흡수식 냉동기를 생산하고 있는데, 배열과 태양열의 이용이 가능하도록

설계하였다. 2단이중효용으로는 100~3000 냉동톤의 흡수식 냉동기를 생산하며, 고압증기와 고온수를 열원으로 사용한다. Sanyo에서는 저온수구동 단효용의 경우 30~525 냉동톤, 증기구동 단효용의 경우 100~700 냉동톤, 그리고 증기구동 이중효용의 경우 100~1500 냉동톤의 흡수식 냉동기를 생산하고 있다. Daikin의 경우 최근에 -55℃의 냉수를 얻을 수 있는 캐스캐이드형 극저온 암모니아 흡수식 냉동기를 개발하였다. 리튬브로마이드 흡수식냉동기 또는 압축식 냉동기의 냉수를 흡수기의 냉각수로 이용하는 고성능의 암모니아저온흡수식 냉동기이다. 또한 코제너레이션 시스템의 배열증기를 이용하여 냉동(증발기)/온수(흡수기)를 동시에 얻을 수 있도록 설계된 흡수냉동시스템도 개발하였다. 냉동/온수 동시 취득운전의 경우 1.0 이상의 COP를 얻는다. 최근 개발한 시스템으로는 2온도 동시취득시스템이 있는데 흡수기 및 증발기를 한 개씩 더 부착하여 서로다른 2온도의 냉수를 얻을 수 있도록 설계하였다. 예를 들어 -50℃와 -30℃의 냉수를 동시에 얻어서 온도레벨의 필요에 따라서 사용할 수가 있어서 가스소비율면에서 유리하다. Hitach Inc.에서는 소형의 경우 30 냉동톤, 대형의 경우 1500 냉동톤까지 가스 및 오일 구동이중효용 흡수식 냉동기를 생산하며, 배열을 이용한 흡수식냉동기도 120~1400 냉동톤의 용량으로 생산하고 있다. 최근에 개발된 ACA 타입의 냉동기는 에너지절약면에서 뛰어난 기술로 여겨지며, 이에 대한 구체적인 내용은 다음

표 9 최근 일본에서의 상업용 대형 암모니아 흡수식시스템 설치실적

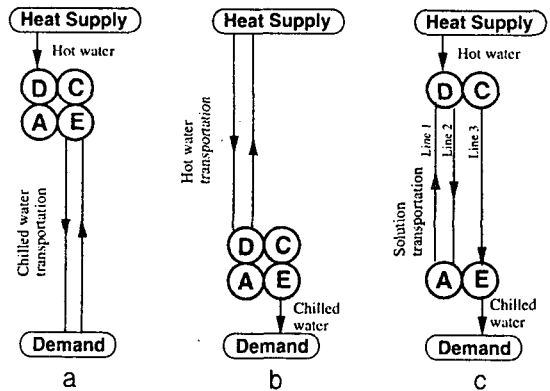
Company (Installation year)	Capacity (Evaporation temp.)	Applications	Heat source
Daikin(1997)	228JRT×2units(-15℃)	Beer factory	Steam(Heavy oil)
Daikin(1998)	500JRT(-15℃)	Milk cooling	Steam(Natural gas)
Daikin(1998)	180JRT(-35℃)	Chemical process cooling	Steam(Natural gas)
Daikin(1998)	500JRT×2units(-15℃)	Beer factory	Steam(Natural gas)
Daikin(1999)	90JRT(-12℃)	Ice storage and Kalina cycle	Co-generation
Hitachi Zosen(1999)	140JRT(-30℃)	Chemical process cooling	Steam
Hitachi Zosen(1999)	55JRT×2units(-15℃)	Ice rink	Natural gas
Hitachi Zosen(1999)	61JRT(-40℃)	Refrigeration ware house	Natural gas
Hitachi Zosen(1999)	69JRT(-40℃)	Refrigeration ware house	Steam(Natural gas)

장의 차세대 흡수식시스템면에서 설명하기로 한다. Kawasaki 냉열의 경우 Hitachi Inc.와 거의 유사한 용량의 병렬형 흡수식냉동기를 생산하고 있다. Ebara의 흡수식냉동기는 1 냉동톤당 4.5kg/hr의 증기소비율을 갖는 에너지 절약형으로 간주되고 있다. Yazaki에서도 대용량의 이중효용 흡수식 냉동기를 생산하고있다.

4. 일본에서 개발된 차세대 흡수시스템

본 장에서는 일본에서 개발중인 소형 및 대형 차세대 흡수식 사이클을 소개한다. 현재까지 많은 흡수식사이클들이 여러 가지 목적으로 개발되어 왔다. 차세대 GAX 사이클로 미국에서는 주로 가정용 냉난방을 위하여 3RT에서 10RT까지 소형이 중심이 되어왔고, 일본에서는 가정용 냉난방용으로 1.7RT에서 3.0RT의 소형과 함께 -50℃까지의 저온용 GAX 사이클 (LGAX), 압축기가 첨가된 하이브리드 GAX 사이클 (HGAX), 폐열을 이용하는 폐열구동 GAX 사이클 (WGAX), 그리고 온돌에의 응용을위한 GAX 사이클 (PGAX) 등이 연구개발되고 있다. 본장에서는 또한 현재 일본에서 개발된 물-리튬브로마이드를 냉매로하는 차세대 흡수식 사이클을 각 회사별로 소개한다. 물-리튬브로마이드 사이클은 주로 대형의 상업용으로 개발되어 왔으나 최근에는 2RT의 공냉식 소형가정용으로도 개발되고 있어, 암모니아-물 사이클과 함께 가정용 공조시장에서 전기구동 압축식 에어컨과 경쟁을 할 것으로 예측된다. 미국에서 개발된 차세대 GAX 사이클들은 본 연구의 전편(강용태⁴⁾)에 소개되어 있고, 일본에서 개발된 차세대 흡수식 사이클들이 표 10에 정리되어 있다. 본 장에서 소개되는 차세대 사이클들의 시스템 다이어그램(system diagram)들은 강용태⁹⁾에 보다 구체적으로 설명되어 있다. 먼저 LGAX 사이클은 -50℃까지의 저온의 증발온도를 얻기위한 GAX 사이클로 용액의 암모니아 농도가 5, 10, 25, 47 및 60%로 여러 분지를 형성하며 온도증첩에의한 GAX 효과를 통해서 저온에서도 1.0 이상의 COP를 얻을 수 있다(Kang 등¹⁰⁾). PGAX 사이클은 65℃ 이상의 응축기 온수출구온도를 얻

을 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 냉난방시스템에 적합한 사이클이다. WGAX 사이클은 기존의 표준 GAX 사이클에서는 200℃ 이상에서 열전달표면이 기체에 장시간 노출되면 부식이 생기게 되는데, 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. 그밖에 차세대 GAX 사이클로는 압축식과 흡수식을 혼합한 HGAX 사이클이 있다. STA 사이클은 용액수송형 흡수식 사이클(solution transportation absorption cycle)을 의미하며, 대기온도하에서 에너지를 흡수식 사이클의 농도차를 이용해서 전달하는 에너지 전달 시스템이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 기존의 현열 전달시스템에서는 발생기, 응축기, 증발기 및 흡수기를 열원측 또는 수요측에 함께 위치시켜 냉수 또는 열수를 이동하도록 하는 것이었으나, STA 사이클에서는 발생기와 응축기는 열원측에, 증발



- a. Sensible heat transportation of chilled water
- b. Sensible heat transportation of hot water
- c. Solution heat transportation

그림 1 용액수송형 흡수식시스템

표 10 일본에서 개발된 차세대흡수식사이클

Cycle	Cycle characteristics	Development status
1. LGAX cycle	T_E as low as -50°C	Open in literature
2. PGAX	T_C as high as 65°C	Applied for Japan patent by TUAT and Tokyo gas
3. WGAX cycle	T_G can be reduced down to 172°C with a higher COP than the SGAX. The corrosion may be solved.	Japan patent by TUAT and Tokyo gas
4. STA cycle	Energy transportation purpose by concentration difference at ambient temperature level. No tube insulation is required.	Open in literature. Under development by TUAT and Ebara
5. Air-cooled H_2O -LiBr cycle	Residential applications Ternary mixture	Hitachi Ltd. Daikin Ltd. Commercialized
6. Two-stage absorber cycle (H_2O -LiBr system)	To lower the chilled water temperature as low as 2°C (Hitachi) and 5°C (Daikin)	Hitachi Ltd. Daikin Ltd.
7. ACA flow cycle	The cooling water passes through absorber, condenser and absorber again. The cooling temperature ranges from 32 to 39°C , so that the pumping power and pipes are reduced.	Hitachi Patent.
8. CAP cycle (Kalina cycle)	Combined absorption and power generation cycle. NH_3 - H_2O absorption system as a bottoming cycle.	Patented by Kalina in 1984.
9. CAPR	CAP cycle for refrigeration applications as low as -20°C	In preparation for patent application
10. Dual loop double effect cycle	A high efficiency absorption system to recover low temperature heat sources such as river water or seawater. Use TFE/NMP.	Sanyo Electric Co. Ltd. Under development
11. Triple effect cycle	Driven by high temperature steam from a garbage incineration plant. Use Nitrate solution at high stage cycle.	Hitachi Zosen Under development
12. Seven effect cycle	An ideal COP of 7.0 with H_2O -LiBr and H_2O -NaOH	US Patent by R. DeVault in 1989
13. LHECUS	Load-leveling Hyper Energy Converting and Utilization System	Under development by TUAT

기와 흡수기는 수요측에 위치시켜 용액의 농도차에 의해서 에너지를 전달하도록 하는 차세대 흡수식 응용시스템이다. 대기온도에서 에너지 전달이 가능하므로 수송관의 단열이 필요없고, 농도차에

의한(즉 잠열에의한) 에너지 전달이므로 수송관의 사이즈가 기존의 현열에 의한 에너지 전달 수송관보다 1/10로 줄어드는 것으로 보고되었다(Kang 등¹¹⁾). STA 사이클은 용액으로 물-리튬브로마이드

드 또는 암모니아-물을 사용할 수 있으며, 암모니아-물의 용액이 더 효과적인 것으로 보고되었다. 공냉식 물-리튬브로마이드 사이클은 가정용 소형의 용량으로 공냉식 열교환기를 사용하므로써 기존의 수냉식에서 큰 공간을 차지하는 냉각탑을 사용하지 않아도 되도록하는 새로운 사이클이다. 현재 일본의 여러 회사에서 연구개발을 하고 있으며, 대기온도에서의 결정화문제를 해결하기 위해서 삼원 또는 사원의 새로운 냉매를 이용하고 있다. 물-리튬브로마이드 2단 흡수식 사이클은 Hitachi의 경우 2°C, Daikin의 경우 5°C까지의 냉수를 얻을 수 있도록 설계된 사이클이다. ACA 흐름 사이클은 Hitachi의 특허출원품으로, 흡수기와 응축기를 통과한 냉각수를 다시 흡수기로 통과하게 하여, 냉각수의 온도범위를 기존의 32~37°C에서 32~39°C로 크게한 사이클이다. 주어진 열용량에 대하여 더큰 온도차를 제공하므로 냉각수의 유량을 줄여서 펌프동력과 냉각수 배관의 크기를 줄일 수 있도록한 에너지 절약형 사이클이다. 실제로 Hitachi에 의하면 30%의 펌프동력을 절감할 수 있는 것으로 보고되었다(Aizawa¹²⁾). CAP 사이클은 흡수식과 동력발생사이클의 혼합사이클로 암모니아-물의 사이클이 전체 혼합사이클의 바터밍 사이클(bottoming cycle)로 이용된다. 1984년 특허출원된 Kalina 사이클이 CAP 사이클의 한 예로서 동력발전사이클로 부터의 터빈배열을 이용하여 암모니아-물의 흡수사이클을 구동하며, 바터밍사이클의 효율은 약 35% 정도로 기존의 발전사이클의 효율을 35%로 가정할 때, 전체 혼합사이클의 효율을 약 57%까지 올릴 수가 있다. CAPR 사이클은 위의 CAP 사이클을 응용하여 발전동력과 함께 저온의 열원을 동시에 얻을 수 있도록하는 사이클로 현재 -20°C의 저온열원을 발전동력과 함께 얻을 수 있는 사이클이 연구개발 중에 있다. 이중루프이중효용 사이클은 일본의 NEDO 프로젝트의 일부로 Sanyo 전기에서 개발한 저온열원을 이용한 고효율 흡수식 사이클이다. 용액으로는 TFE/NMP를 이용하고 있다. 현재 Hitachi Zosen에서 개발중인 삼중효용 사이클은 쓰레기 소각장으로부터의 고온열원으로 구동되는 사이클로 고압 고온에서 용액의 화학적불안정성을 해

결하기 위해서 고압측 루프에서는 Nitrate 수용액을 사용하였다. 칠중효용 사이클은 전술한 바와같이 1989년 미국의 R. DeVault가 개발한 것으로, 현재 개발된 흡수사이클중에서 가장 효용수가 높은 사이클로 이론 COP가 7.0이고, 용액으로는 H₂O-LiBr과 H₂O-NaOH를 사용한다. 끝으로 LHECUS(Load-leveling Hyper Energy Converting and Utilization System)는 현재 일본의 TUAT에서 개발중인 부하평준화, 에너지변환 및 이용시스템이다. 발전시스템의 배열 및 쓰레기 소각장으로부터의 폐열원을 이용하여 에너지를 원거리수송 및 저장하여 가정의 수요측까지 손실없이 전달하는 21세기형 복합에너지 캐스캐이드 시스템이다.

5. 첨가제에 의한 마란고니 대류모델

본 장에서는 흡수과정중 첨가제에 의한 열 및 물질전달의 성능향상 메카니즘을 규명하는 모델을 개발하여 소개한다. 마란고니대류(Marangoni convection)는 흡수제를 첨가했을 때 발생하는 용액의 표면장력의 차에 의해서 액체표면에서 발생하는 대류이며, 액체와 기체의 혼합을 증가시켜 흡수성능을 높여주는 역할을 한다. 물-리튬브로마이드 시스템에서의 Kashiwagi model, Salting-out model 및 Solubility model 을 소개하고, 암모니아-물 시스템에서의 Radical-out model 을 가시화 결과와 함께 소개한다. 현재 미국과 일본에서 단효용 및 이중효용의 물-리튬브로마이드 시스템에는 옥틸알콜(2E1H) 및 n-Octanol을 주로 사용하고 있으나, 삼중효용의 시스템에서는 200°C 이상 고온에서의 화학적 분해현상에 의해서 새로운 첨가제의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 암모니아-물 시스템에서는 아직까지 실제 제품에 사용되지 않고 있으나, 최근의 연구결과들에 의하면 역시 옥틸알콜(2E1H) 및 n-Octanol이 여러 가지 흡수제들중에서 흡수성능을 가장 잘 높여주는 것으로 보고되고 있다.(Kang 등¹³⁾)

5.1 물-리튬브로마이드 용액

a. Kashiwagi model(Kashiwagi, 1998)

표 11 LiBr 수용액에서 마란고니 대류 모델들의 비교

Models	Kashiwagi model	Salting-out model	Solubility model
Onset condition	Additive droplets	Salting-out effect by surface tension gradient	Negative concentration gradient of surface tension before solubility limit Imbalance of tension forces after solubility limit
Valid ranges	After solubility	Before solubility	Whole ranges
Criterion	$\sigma_1 > \sigma_2 + \sigma_3$	$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial x_{LiBr}} \right _{w/0add} > 0$ $\left. \frac{\partial \sigma}{\partial x_{LiBr}} \right _{w/add} < 0$	$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial x_{LiBr}} \right _{w/0add} > 0$ and $\left. \frac{\partial \sigma}{\partial x_{LiBr}} \right _{w/add} < 0$ $\sigma_1 > \sigma_2 + \sigma_3$

Kashiwagi¹⁴⁾는 물-리튬브로마이드 용액에서 마란고니대류는 흡수발생 후 일어나는 표면장력과 계면장력의 불평형(imbalance)에 의해서 일어나며, 흡수표면에서 첨가제의 액적의 존재가 기본적으로 요구된다고 주장하며, 여러 흡수첨가제의 계면장력을 실험적으로 측정하여 가시화결과와 함께 제시하였다.

b. Salting-out model(Hozawa 등, 1991)

Hozawa 등¹⁵⁾은 물-리튬브로마이드 용액에서 첨가제의 액적이 흡수표면에 존재하지 않은 상태에서 마란고니 대류가 발생함을 밝혀냈고, 이를 토대로 마란고니대류는 표면장력의 농도구배에 의해서 발생한다고 주장하였다. 실제로 여러 연구자들도 (Kim 등¹⁶⁾, Daiguji 등¹⁷⁾) 동일한 연구결과를 발표하였다. 이 경우 salting-out 현상은 물 성분의 흡수에 의해서 Li⁺와 Br⁻ 들과 결합해있던 흡수첨가제의 분자들이 떨어져나와 표면으로 이동하는 현상을 의미한다.

c. Solubility model(Kang 등, 1999)

Kang 등¹⁸⁾은 8가지 서로다른 흡수첨가제의 표면장력 및 계면장력을 측정하고, 그들의 농도 및 온도구배를 실험적으로 얻어서 가시화 결과와 비교한 후, 위의 두 모델은 마란고니 대류를 일반적으로 설명할 수 없음을 밝히고 다음의 일반적 모델을 제안하였다. 즉 “마란고니 대류의 기본원인은 흡수첨가제의 용해도(solubility) 이내에서는 표면장력의 농도구배이고, 용해도 이후에서는 표면 및 계면장력들의(tension forces) 불평형이다”

라고 주장하였다. 실제로 solubility 모델은 물-리튬브로마이드 용액에서 일반적으로 사용되고있는 흡수첨가제들의 실험결과와 잘 일치한다. 물-리튬브로마이드 용액에서 각 마란고니대류모델에 대한 비교가 표 11에 정리되어 있다.

5.2 암모니아-물 용액

a. Radical-out model (Kang 등, 1999)

Kang 등¹⁹⁾은 물-암모니아 용액에서 그림 2에 나타난 표면장력의 농도구배를 실험적으로 밝혀내고, 용해도 이내에서 암모니아-물 용액의 표면장력의 농도구배가 마란고니대류의 기본 원인이

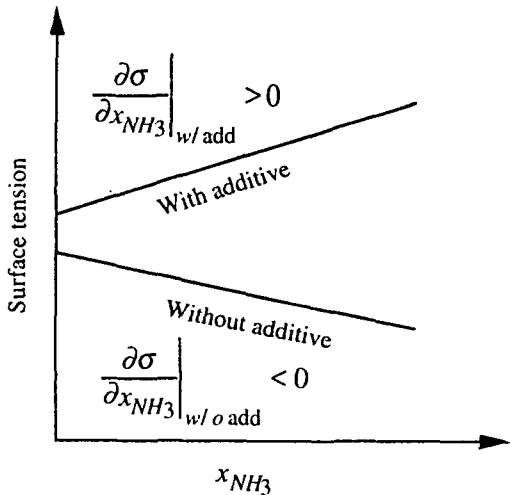


그림 2 암모니아-물 시스템에서 표면장력의 온도구배



그림 3 암모니아-물 용액에서 마란고니 대류의 가시화(2E1H 500ppm)

며, 용해도 이후에서는 물-리튬브로마이드계와 다르게 표면 및 계면장력들의 불평형은 마란고니 대류 발생의 판단근거로 적용될 수 없음을 밝혀내었다. 이 경우 radical-out 현상은 암모니아의 흡수 과정에 의해서 암모니아 수용액과 결합해있던 첨가제의 알킬기(radical)가 떨어져 나와 흡수표면으로 이동하는 현상을 의미한다. 그림 3에 암모니아-물 수용액에 옥틸알콜을 첨가하였을 때 마란고니대류의 가시화 결과가 나타나 있다.

정리하면, 물-리튬브로마이드 및 암모니아-물 시스템에서 위의 모델들을 통하여 적용가능한 흡수첨가제를 선택할 수가 있다. 그러나 농도구배의 크기와 마란고니대류의 강도와와의 관계는 아직 실험적으로 밝혀지지 않았고 앞으로의 연구대상으로 남아 있다.

6. 차세대 흡수식 용액

현재 미국에서는 Trane, Carrier, Phillips Engineering, 그리고 ORNL/DOE 에 의하여 터너리(ternary) 또는 쿼터너리(quarternary) 암모니아 혼합용액이 시스템의 성능을 높이기 위하여 개발되고 있다. 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/DOE 에서 "Q2"라 불리는 새로운 쿼터너리 암모니아 혼합용

액이 부식시험을 거친 후 개발되었는데, GAX의 온도범위 내에서 암모니아-물의 바이너리(binary) 용액보다 부식성이 훨씬 감소되는 것으로 보고되었다(Fiskum 등²⁰). H₂O-LiBr 용액의 경우, 삼중효용시스템이 개발되고 있는바, 고온에서(약 200℃ 이상) 기존의 첨가제(2E1H)가 분해되며, 인히비터(Inhibitor)가 불안정해지는 문제가 발생하는 것으로 알려져있다. 따라서 미국의 Battelle 연구소에서는 에너지성(DOE)의 재정적지원으로 새로운 인히비터가 첨가된 작동유체를 개발중에 있는데 LiOH-Li₂SO₄-Li₂MoO₄-LiBr-H₂O가 그중 하나이다.

일본에서는 마추시타(Matsushita) 회사에서 암모니아-물의 GAX 시스템의 성능을 높이기 위해서 NH₃-H₂O-Li₂NO₃를 사용하고 있으나, 그로인한 고온에서의 부식문제는 해결되어야 할 문제이다. H₂O-LiBr 용액의 경우, 두가지 방향에서 작동유체가 연구되고 있다. 하나는 미국과 동일하게 삼중효용 시스템의 고온에서의 화학적 분해현상과 인히비터의 불안정성 해결에 관한 연구이며, 다른 하나는 공냉식 H₂O-LiBr 시스템을 개발하기 위한 연구이다. 삼중효용 시스템의 용액들로는 LiOH-Ca(NO₃)₂-Li₂MoO₄-LiBr-H₂O가 고려되고 있다. 공냉식의 경우, Li₂NO₃-KCl-LiBr-H₂O가 결정온도의 하강을 목적으로 연구되고 있다.

7. 사이클 모델링

현재 흡수식사이클의 대표적인 프로그램으로는 ABSIM(ABsorption SIMulation)과 EES(Engineering Equation Solver)가 있다. ABSIM은 미국의 에너지부(DOE)의 지원하에 이스라엘의 Dr. Grossman가 개발한 모듈타입의 흡수식 전용 모사프로그램이다. 흡수식 시스템을 구성하는 12가지의 열교환기 서브루틴이 포함되어 있고, 물-리튬브로마이드 및 암모니아-물을 포함하여 13가지의 흡수용액을 사용할 수 있도록, 각각의 열물성치 프로그램들이 내장되어 있다. 가장 최근에 개발된 ABSIMW 5.06에는 압축기가 첨가되었고, 자동적으로 감도분석(Parametric analysis)이 가능하도록하는 기능이 첨가되었다. 반면,

EES는 Wisconsin대학교의 Dr. Klein 그룹이 개발한 비선형 대수식 및 미분방정식의 해를 구하는 프로그램이다. EES는 흡수식 뿐만아니라 압축식에 사용되는 여러 가지 용액 및 냉매들의 열적 물성치 서브루틴을 내장하고 있어 ABSIM 보다 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 흡수식시스템의 모사를 위해서는 ABSIM이 여러 가지 자동감도분석기능들을 포함하고 있어 유용하며, 특히 초보자들에게는 더욱더 용이하다.

8. 결론 및 제언

본 연구에서는 차세대 흡수식 열펌프의 개발을 위하여, 현재 미국과 일본에서 개발되고 있는 흡수식 기술들을 조사 분석하였는 바, 다음의 결론 및 제언들로 본 연구를 마무리 하고자 한다.

1) 사이클 모델링 및 차세대 흡수식 시스템

암모니아-물 사이클의 경우, 전편에서 소개된 반 수냉식 GAX 사이클이 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 혼합사이클로 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. 일본에서 개발되고 있는 차세대 흡수사이클들은 냉난방, 저온응용 및 복합발전시스템등 여러 면에서 응용이 되고 있다. 특히 STA 시스템, 공냉식 $H_2O-LiBr$ 시스템, 혼합발전 시스템(CAP cycle) 등은 유망한 차세대흡수식 사이클들로 추천된다. 여러 가지 하이브리드 시스템들이 개발되고 있는바, 흡수-발전 하이브리드, 흡수-증기압축식 하이브리드 및 $H_2O/LiBr-NH_3/H_2O$ 하이브리드 등이 연구되고 있다. 흡수식 사이클의 고성능화를 위해서는 $H_2O/LiBr-NH_3/H_2O$ 혼합 사이클이 연구되고 있는 바, $0^\circ C$ 이상의 증발온도에 대하여 $H_2O/LiBr$ 사이클을, $0^\circ C$ 이하의 증발온

도에 대하여 NH_3/H_2O 사이클을 적용하는 하이브리드 사이클이 강력하게 추천된다.

2) 성능 및 제품의 크기

현재 각광을 받고있는 GAX 가정용 흡수식 열펌프의 경우, 기존의 전기구동식 열펌프에 경쟁력을 갖기 위하여 버너 효율을 고려한 실제 목표성능으로 최소한 냉방 COP=0.7, 난방 COP=1.5를 얻도록 한다. 소형 가정용의 제품의 크기로는 3RT 용량기준으로 목표치로서 높이 950mm, 폭 960mm, 그리고 너비 500mm 등이 경제성을 고려하여 타당한 것으로 평가된다.

3) 차세대용액, 인히비터 및 흡수제

현재 미국과 일본에서는 암모니아-물시스템의 성능을 높이기위하여 여러 가지 삼원 또는 사원의 혼합용액을 개발중에 있다. 일본에서는 GAX 시스템의 성능을 높이기 위해서 $NH_3-H_2O-Li_2NO_3$ 를 사용하고 있으나, 그로인한 고온에서의 부식문제는 해결되어야 할 문제이다. 물-리튬브로마이드 시스템의 경우, 미국에서는 새로운 인히비터가 첨가된 작동유체를 개발중에 있는데 $LiOH-Li_2SO_4-Li_2MoO_4-LiBr-H_2O$ 가 그중 하나이다. 일본에서는 두가지 방향에서 작동유체가 연구되고 있다. 하나는 미국과 동일하게 삼중효용 시스템의 고온에서의 화학적 분해현상과 인히비터의 불안정성을 해결하기 위한 연구이며, 다른 하나는 공냉식 $H_2O-LiBr$ 시스템을 개발하기 위한 연구이다. $LiOH-Ca(NO_3)_2-Li_2MoO_4-LiBr-H_2O$ 이 삼중효용에 응용을 위해서 연구되고 있고, 공냉식응용의 경우, $Li_2NO_3-KCl-LiBr-H_2O$ 가 결정온도의 하강을 목적으로 이용되고 있다. 흡수제로는 물-리튬브로마이드 및 암모니아-물시스템에서 노말 옥탄올과 옥틸알콜이 가장 적합한 흡수첨가제로서 추천되고 있다.

4) 21세기 흡수식의 전망

환경친화적인 자연냉매를 사용하므로 기존의 압축식냉매를 대체할 차세대 공조용 냉매로서 손색이 없으며, 성능의 극대화와 제품의 소형화를 통해서 저온응용, 중대형의 상업용 공조설비 및 소형 가정용분야에도 많은 응용이 기대된다. 앞으로는 종래의 공조설비로서의 흡수식뿐만 아니라, 에너지 저장 및 전달, 발전설비와의 혼합에 의한 전력

부하평준화 및 물질순환형 에너지 캐스케이드 시스템등 보다 넓은 분야에 흡수식개념을 적용하는 것이 적극 추천된다.

후 기

본 저자는 여러 가지 기술적 제안과 자료를 제공해준 Dr. Kashiwagi(TUAT), Dr. Kunugi(TUAT), Mr. Aizawa(Hitachi Inc.), Mr. Ebisu(Daikin), Dr. Takei(Daikin), Mr. Sawada(Matsushita), Mr. Furadera(Hitachi Zosen) 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, a study on DHC system incorporating advanced absorption heat pumps, *Proceedings of The International Absorption Heat Pump Conference*, Vol. 2, pp. 753~758, Montreal, Canada.
2. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 1999, "Experimental correlation of combined heat and mass transfer for NH₃-H₂O falling film absorption," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, No. 4, pp. 250~262.
3. Kang, Y. T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 1999, "Analytical investigation of two different absorption modes : Falling film and Bubble types," In press, *International Journal of Refrigeration*.
4. 강용태, 1998, "미국 및 일본의 암모니아-물 흡수식열펌프 기술(1) - 미국의 GAX 사이클", *공기조화 냉동학회지*, 제27권, 1호, pp. 53~74, 1998.
5. DeVault, R. C. and Biermann, W. J., 1989, Seven-effect absorption refrigeration, U.S. Patent No. 4,827,728.
6. Kang, Y. T., Kunugi, Y., and Kashiwagi, T., 1999, "Review of advanced absorption cycles, Part I : Performance improvement and temperature lift enhancement," Submitted to *International Journal of Refrigeration*.
7. Kunugi, Y., Kang, Y. T. and Kashiwagi, T., 1999, "Review of advanced absorption cycles, Part II : Next generation technologies," Submitted to *International Journal of Refrigeration*.
8. 일본냉동설비 기술위원회, 1999, "최근의 암모니아냉동설비 납입실적표," *일본 냉동학회지*, Refrigeration, Vol. 74, No. 860, pp. 69.
9. 강용태, 1999, "흡수식냉동기 및 열펌프의 차세대기술 및 응용," 흡수식 냉동기 및 열펌프 워크샵, 한국정밀화학공업진흥회, 1999년 6월 4일, 서울.
10. Kang, Y. T., Kunugi, Y. and Kashiwagi, T., 1999, "Advanced absorption systems for low temperature applications," *Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference*, March 24~26, Munich, Germany, pp. 529~532.
11. Kang, Y. T., Sambe, Y., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 1998, "Absorption heat pump systems for solution transportation at ambient temperature - STA cycle," Submitted to *Energy-The International Journal*.
12. Aizawa, M., 1999, "A new energy saving technology in absorption chiller/heater : ACA flow," *International Sorption Heat Pump Newsletter*, Vol. 5, No. 1, pp. 5~7.
13. Kang, Y. T., Iizuka, K., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 1999, "Experiments on heat transfer additives in NH₃-H₂O systems," *Proceedings of the International*

- tional Sorption Heat Pump Conference*, March 24~26, Munich, Germany, pp. 291~296.
14. Kashiwagi, T., 1988, "Basic mechanism of absorption heat and mass transfer enhancement by the Marangoni effect," Newsletter, *IEA Heat Pump Center*, Vol. 6, No. 4, pp. 2~6.
 15. Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J., and Tsukada, T., 1991, "Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant," *J. of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, No. 2, pp. 209~214.
 16. Kim, K. J., Berman, N. S., and Wood, B. D., 1996, "The interfacial turbulence in falling film absorption : effects of additives," *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 19, No. 5, pp. 322~330.
 17. Daiguji, H., Hihara, E. and Saito, T., 1997, "Mechanism of absorption enhancement by surfactant," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 8, pp. 1743~1752.
 18. Kang, Y. T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 1999, "Experimental investigation of Marangoni convection in aqueous LiBr-H₂O solution with heat transfer additives," In press, *ASME, Journal of Heat Transfer*.
 19. Kang, Y. T., Akisawa, A., and T. Kashiwagi, T., 1999, "Visualization and model development of Marangoni convection in NH₃-H₂O system," In press, *International Journal of Refrigeration*.
 20. Fiskum, R. J., Adcock, P. W., DeVault, R. C., 1996, "United States Department of Energy thermally activated heat pump program," Proceedings of The International *Ab-Sorption Heat Pump Conference*, Vol. 1, pp. 101~107, Montreal, Canada.