

일본의 흡수식 냉동기 연구개발 동향

흡수식 냉동기의 구성요소에 관한 성능향상 및 배열을 이용한 코제네레이션 시스템의 소개한다.

정종수

일본와세다대학 기계공학과 박사후기과정 (jeong@ruri.waseda.jp)

황규대

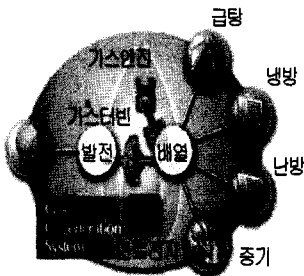
일본와세다대학 기계공학과 박사후기과정 (hwang@ruri.waseda.jp)

1997년 12월에 개최된 지구온난화 방지 교토회의 (COP3-기후변동협조조약 제 3회 체결국 회합)에서, 일본은 2008년~2012년까지 온실효과가스의 배출량을 1990년도 시점을 기준으로 6% 삭감하기로 합의하였다. 이러한 배경에 따라 CO₂ 배출량의 삭감에 대한 새로운 공업기술의 전개가 진행되고 있으며, 일본의 냉동공조산업 분야에서도 코제네레이션이라는 에너지 절약 관점으로부터 흡수식 냉동기가 다시 주목을 받게 되는 계기가 되었다.

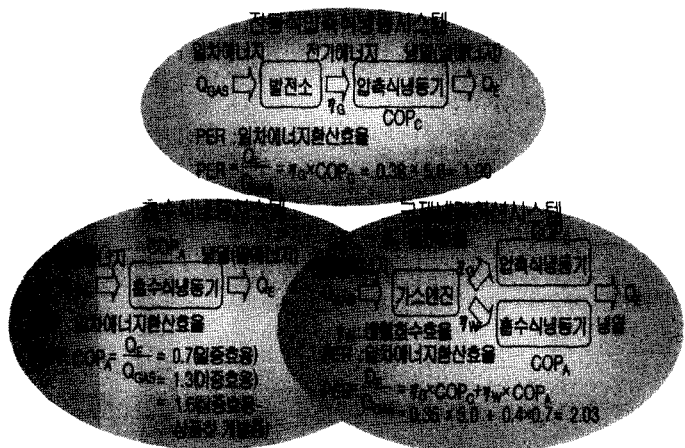
흡수식 냉동기는 압축식 냉동기와 달리, 주요 구동원으로서 동력을 필요로 하지 않으며, 가스구동 기기의 배열 또는 태양열 등을 직접 이용할 수 있는 열구동형 시스템이다. 따라서, 코제네레이션 시스템에

흡수식 냉동기를 적용하는 것으로 고온에서 저온 영역에 이르기까지의 에너지를 유효하게 이용할 수 있다. 그림 1은 가스 등의 연료로 엔진, 터빈 또는 연료전지를 구동시켜, 전기를 발생시킴과 동시에 각 원동기에서 발생한 배열을 급탕, 냉난방 등에 이용하는 코제네레이션 시스템을 나타낸 것이다.

그림 2에는 종래의 전동 압축식 냉동기와 흡수식 냉동기 및 흡수식을 이용한 코제네레이션 시스템의 1차에너지 환산효율(PER-primary energy ratio)을 나타내었다. 여기서, 1차에너지 환산효율이란 시스템에 유입되는 연료가 1차에너지로서 얼마만큼의 열에너지로 변환될 수 있는가를 나타내는 지표이다. PER이 크면 클수록 에너지 절약에 대한 기여도



[그림 1] 코제네레이션 시스템



[그림 2] 각 시스템의 PER 비교

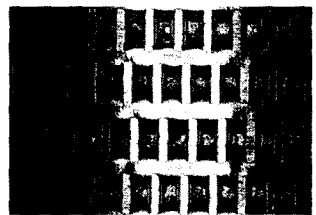
가 높다고 할 수 있다. 현재, 일본에서 사용되고 있는 흡수식 냉동기의 PER을 압축식과의 비교를 통해, 흡수식 냉동기의 에너지 절약도를 살펴보고자 한다. 전동 압축식 냉동기의 경우, COP가 평균 5.0, 발전소에서 발전율이 0.38이므로 PER은 약 1.9가 된다. 반면, 흡수식 단독 구동시스템인 경우, 온수를 구동열원으로 하는 단효용 흡수식 냉동기의 PER은 0.7, 이중효용 흡수식 냉동기의 경우는 1.3이 되어, 단독구동으로서 효율이 좋은 이중효용으로 비교할 경우에도 전동 압축식 냉동기보다는 효율이 낮음을 알 수 있다. 이러한 흡수식 냉동기의 단점을 보완하기 위해, 일본의 신에너지·산업기술 종합개발기구(NEDO)가 주축이 되어 PER기준 1.6 이상의 삼중효용 흡수식 냉동기의 연구개발이 진행 중이며, 히타치(주), 다이킨(주), 에바라(주), 야자키소교(주) 등의 관련 제조업체에서도 상품화를 위해 시작기를 제작, 실험을 진행하고 있다. 하지만, 흡수식 냉동기의 고효율화를 실현하기 위한 방법으로 사이클을 다중효용화하는 것은 시스템의 대형화 문제를 초래하므로 흡수식 냉동기의 구성요소에 대한 대폭적인 콤팩트화와 함께 전열성능의 향상이 요구되어 진다. 한편, 그림 2에 나타낸 바와 같이 가스엔진을 원동기로 사용한 코제네레이션 시스템의 경우, 배열로 단효용 흡수식 냉동기를 구동시켜 PER이 2.0에 이르는 것을 알 수 있다. 이러한 수치는 전동 압축식 냉동기보다 높은 에너지 이용효율을 나타내는 것으로 코제네레이션 시스템에 있어서 흡수식 냉동기의 사용이 적극 검토되고 있는 상황이다. 이와 관련하여 본고에서는, 현재 일본에서 연구가 진행되고 있는 흡수식 냉동기의 요소기술과 21세기에 들어서 크게 주목을 받고 있는 흡수식 이용 코제네레이션 시스템의 연구동향을 소개하고자 한다.



[그림 3] 쉘앤튜브A관



[그림 4] 탑크로스관



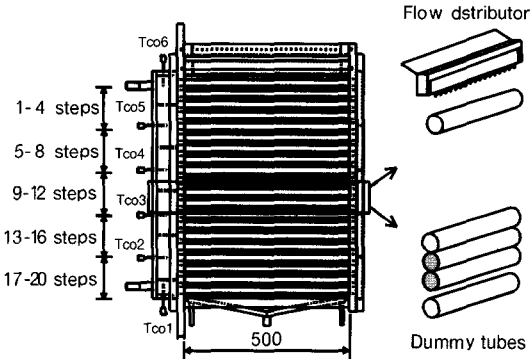
[그림 5] 엔드크로스관

흡수식 냉동기의 구성요소 성능 향상에 관한 연구동향

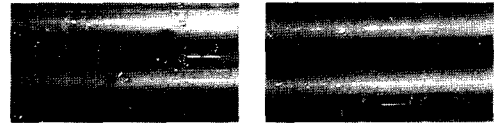
흡수식 냉동기는 흡수기, 증발기, 응축기, 고온 및 저온재생기, 용액열교환기 등의 컴포넌트로 구성되며, 각 열교환기의 성능 개선을 통해 시스템의 효율 향상을 기대할 수 있다. 요소 중에서도 흡수기는 가장 큰 용적을 차지하며 시스템 성능에도 큰 영향을 미치는 요소로 이에 대한 성능개선 및 소형화에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 지금까지 일본에서 수행된 흡수기 성능 향상에 관련된 연구는, 각종 흡수기용 전열축진관의 개발 및 열전달 성능 평가(히타치제작소, 동경가스), 계면활성제 첨가에 의한 전열성능 향상 메커니즘의 규명(동경농공대), 전열관의 피치, 단수, 흡수용액의 젖음성이 전열성능에 미치는 영향(오사카시립대) 등을 들 수 있다. 본고에서는 최근 일본에서 개발된 흡수기용 전열축진관을 중심으로 고성능 전열관에 대해 소개하고, 기존의 연구에서는 충분한 검토가 이루어지지 않았던 흡수기 하단부에서의 성능 저하에 관한 원인 규명과 성능 개선에 관한 연구에 대해서도 간단히 설명하고자 한다.

흡수기용 고성능 전열관

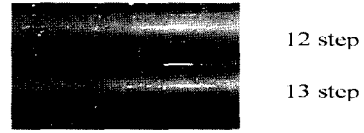
흡수기용 전열관은 일반적인 평활관에 비해 관의 표면적이 크고, 액류분류기에서 유하되는 흡수용액이 전열관의 축방향으로 바로 퍼질 수 있어야 하며 전열관 전체에 골고루 젖어야 한다는 조건을 필요로 한다. 이러한 조건을 갖춘 전열관 개발을 위해 여러 가지 형상의 전열관이 제작되고 있다. 지금까지 일본에서 시판용으로서 공표된 수평 유하액막식 흡수기용 고성능 전열관으로는 표면 형상에 따라 핀튜브, 로렛튜브, 플랫티드튜브 등 크게 3 종류로 분류



[그림 6] 흡수기 유닛



(a) Without straightener (b) With distributor



(c) With dummy tube

[그림 7] 유하액막의 유동형태(하단부)

할 수 있다. 이들 전열관의 개발은 주로 히타치전선(주), 산요전기(주), 고베제강소(주), 후루카와전기(주) 등의 주도로 이루어지고 있다.

핀튜브(fin machined tube)에는 써모엑셀관(thermoexcel tube), 탑크로스관(topcross tube), 엔드크로스관(endcross tube)등으로 분류된다. 히타치전선에서 개발한 써모엑셀A(그림 3)는 카와마타(kawamata)의 흡수기 성능시험(계면활성제 첨가시)을 통해 평활관에 비해 열전달계수는 2배, 물질전달계수는 1.5배 정도 성능이 향상됨을 확인하였다. 탑크로스관(topcross tube; 그림 4)은 핀의 끝부분에 전열면적을 증가시키기 위해 슬릿 가공을 하였으며 흡수용액이 전열관의 축방향으로도 원활하게 유동할 수 있도록 다수의 홈을 가공한 전열관이다. 엔드크로스관(endcross tube; 그림 5)은 고베제강소(주)에서 최근 VOF(volume of fluid) 시뮬레이션 기법으로 개발한 전열관으로 탑크로스관에 비해 핀의 끝부분을 피라미트 형상으로 변형시켰으며, 관내 열전달계수 향상을 위해 관내에도 나선형 돌기가 가공되어 있다.

로렛튜브(knurling tube)는 후루카와전기에서 주로 생산하고 있으며 싱클 로렛튜브(f-tube)와 크로스 로렛튜브가 주류를 이룬다.

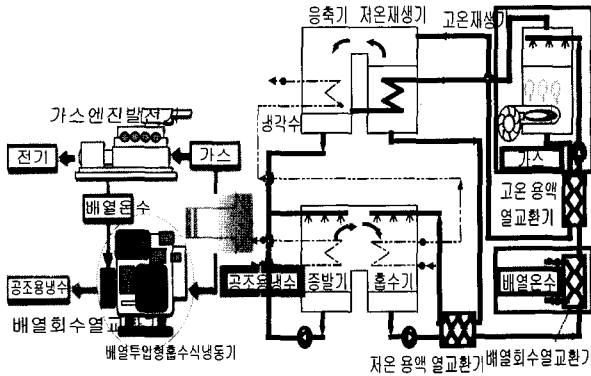
플러티드튜브(fluted tube)에는 화병관(floral tube)과 덤프코관(DIMPKO tube)등으로 나누어지며, 화병관의 경우, 축방향으로 평행한 홈을 가공한 전열관으로 요철의 곡률반경, 홈 깊이, 홈 피치를 흡수기용에 맞추어 최적화한 것이다. 전열면적은 평활관과 거의 동일하지만, 인발가공에 의한 가공성이 우수하다는 점과 단위길 이당 중량이 평활관과 비슷

하다는 장점이 있다. 산요전기(주)에서 화병관을 이용하여 흡의 열수와 피치에 관한 최적화 실험을 수행하여 평활관에 비해 흡수성능이 40% 향상된 결과를 얻었다.

앞에서 언급한 흡수기용 전열관의 경우, 단관으로서는 성능이 우수하여도 관군으로 되면 관의 배열 단수 및 전열관 피치에 따라 성능이 달라질 수 있다. 이와 관련하여 흡수기 하단부에서의 성능 저하에 관련된 연구내용을 소개하고자 한다.

흡수기 하단부의 성능 개선에 관한 검토

흡수기 성능 개선을 위해 여러 가지 연구가 수행되고 있지만 실제 상용화된 흡수식 시스템의 흡수기(수평전열관을 수직 방향으로 20단 이상 설치한 경우) 내부의 성능 변화에 관한 연구는 아직까지 충분히 검토되고 있지 않다. 평활관은 물론 고성능 전열관을 설치한 경우에서도 흡수기 하단부에서 급격히 성능이 저하됨을 실험결과를 통해 알 수 있었다. 와세다대학에서는 이러한 현상에 주목하여 그림 6에 보이는 것처럼 흡수기의 중단부에 액류분류기(흡수용액을 일시적으로 체류시켜 온도와 농도 분포를 균일화시키는 효과)와 더미전열관(흡수용액의 하단부 젖음성 개선 효과)을 설치하여 유하액막의 유동형태를 변화시켰을 경우, 하단부에서 어떠한 성능 변화가 있는지를 실험적으로 검토하였다. 그림 7은 정류기 설치에 따른 유하액막의 유동양상을 가시화한 것으로 사진에서도 알 수 있듯이 액류분류기의 설치로 하단부에서도 상단부와 같은 활발한 마관고니 대류가 다시 발생하고 있음을 알 수 있다.



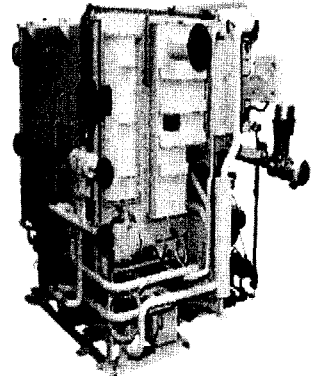
[그림 8] 코제네레이션 배열을 이용한 제네링크

배열 단수에서의 국소 관외열전달계수 및 물질전달계수는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에서는, 정류기를 설치하여도 관외열전달계수와 물질전달계수의 변화가 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나, 계면활성제를 첨가한 경우에서는, 더미전열관을 삽입하여 열전달계수와 물질전달계수가 각각 7%, 10% 정도 향상되었고, 액류분류기 설치를 통해 열전달계수는 22%, 물질전달계수는 40% 정도 향상되는 결과를 얻었다. 이상의 결과로부터 흡수기 전체 성능향상을 위해 계면활성제를 첨가한 경우에서는, 액류분류기와 같이 흡수용액의 온도 및 농도의 균일화와 함께 흡수용액 안의 계면활성제 분포를 고르게 하는 것이 하단부의 성능을 향상시키는데 유효하다고 사료된다.

이상, 일본에서의 흡수기용 전열관 개발 현황과 흡수기 내부의 성능 변화에 관한 검토에 대해 소개하였다. 위에서 언급한 수평식 흡수기용 전열관 이외에도 최근에는 오사카시립대학, 오사카가스(주), 동경가스(주) 등에서 흡수기의 컴팩트화를 위한 수직형 플레이트식 흡수기 개발이 진행되고 있으나, 흡수기 상부에서 하부에 이르기까지 흡수용액을 균일하게 분포시키는 것과 증발기에서 유입되는 냉매증기의 유로를 확보하는 것이 중요한 과제로 남아 있다.

흡수식 냉동기를 이용한 코제네레이션 배열시스템의 기술 동향

흡수냉동사이클은 배열 등을 직접열원으로 이용하



[그림 9] 제네링크(히타치제작소, 냉방능력:422kW)

여 냉동효과를 얻을 수 있다. 또한, 흡수히트펌프사이클을 사용하면, 구동열원으로 투입된 열량보다 많은 열량을 얻는 증열(제 1종 히터펌프)과 구동열원온도보다 높은 온도를 취출하는 승온(제 2종 히터펌프)도 가능하다. 본고에서는 최근 관심이 집중되고 있는 코제네레이션용 흡수냉동사이클에 대해 구체적인 기술 동향을 소개하고자 한다.

코제네레이션용 배열투입형 가스 흡수식 냉동기 (제네링크)

제네링크는 그림 8에 나타난 바와 같이, 종래의 이중효용 가스 흡수식 냉동기의 용액순환경로에 배열회수 열교환기를 설치한 것으로, 가스엔진으로부터 발생하는 100℃ 이하의 배열온수를 이용하여, 흡수용액을 열교환기에서 예열시켜, 결과적으로 적은 열원으로 구동시키는 냉동기이다. 주요 특징으로는 배열이용 전용기가 필요하지 않기 때문에 설비는 종래의 흡수냉동기에 배열회수 열교환기나 배열제어용밸브 등을 부가하는 것만으로 관련제어공사, 냉각탑 및 냉각수 배관공사가 필요 없게 되며, 초기비용의 절감과 에너지 절약을 도모할 수 있다. 1991년부터 제네링크의 개발이 시작되어, 1996년도에 동경가스(주), 산요전기(주), 히타치제작소(주), 야자키교(주)가 코제네레이션 배열을 이용한 배열투입형 가스흡수식 냉동기를 개발한 후 제네링크로 명명하여 시판되었다. 표준 사양으로는 COP 1.1, 배열 투입 운전시 연료가스 절감율이 10%~15%였다. 그림 9는 냉방능력이 422kW, 연료가스 절감율이 15%,



크기가 W3.1m×D2.3m×H2.3m인 히타치제작소(주)가 만든 제네링크 상품의 사진이다. 제네링크가 상품화된 이후, 제네링크의 우수성이 시장에서 평가되어, 1999년도 말에 이르러 설치용량은 186MW(53000RT)가 되었으며 현재 보급율이 급격히 증가하고 있다. 이처럼 배열이용에 효율이 뛰어난 제네링크에 의해, 플랜트 사업장 뿐만 아니라 빌딩이나 상업시설과 같은 냉방이 중심인 건물에서도 광범위하게 사용되고 있다. 단, 운전형태에 따라서는 코제네레이션 시스템의 배열낭비가 크다는 단점이 지적되고 있었으나, 그 후 2003년에 들어서는 한층 개량이 진척되어 동경가스(주)와 산요전기(주)의 공동개발로 COP 1.32(고위발열량기준), 연료가스를 25%까지 절감할 수 있는 초에너지 절약형(352kW~1,758kW)의 10기종이 개발되었다. 종래의 제네링크에서 문제가 되었던 운전시 효율적인 배열 회수가 어려웠던 점이 개선되어 배열을 흡수용액의 예열 뿐만 아니라 배열을 열원으로하는 재생기를 새롭게 부착함으로써 배열을 낭비없이 회수하여 전체적으로 높은 효율의 코제네레이션 시스템을 구축하게 되었다.

코제네레이션용 배출가스투입형 흡수식 냉동기

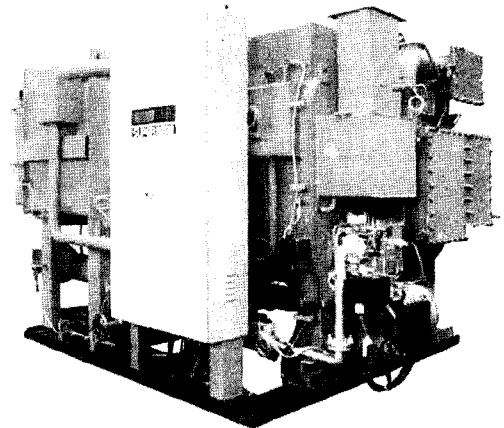
가스엔진의 배열을 고온배출가스와 온수로 나누어 유효 이용함으로써, 에너지효율과 배열구동비율을 높여온 에너지절약형 저비용 배출가스투입형 흡수식 냉동기를 오사카가스(주), 카와주냉열공업(주)이 2000년도에 개발하여 발매하였다. 가스엔진의 재킷에서 얻어지는 온수는, 흡수냉동기에 내장되어 있는 배열회수 열교환기로 공급되어, 저온 재생기로 들어가는 흡수용액의 가열에 이용되며, 배출가스를 이중효용사이클의 고온재생기의 가열에 직접 이용할 수 있는 시스템을 구축함으로써, 냉방부하 40%를 배열만으로 운전 가능하게 되었다. 배열운전효율 COP는 0.86이다.

배출가스 투입형 흡수식 냉동기를 이용한 시스템으로서 특히 주목을 받고 있는 것이 마이크로 가스 터빈 코제네레이션 시스템이다. 마이크로 가스 터빈은 종래의 가스터빈이 1000kW이상의 대형기종이 주류인데 반해 150kW이하인 초소형타입으로서 소규모의 오피스나 레스토랑, 상점 등에서 필요한 전력과 함께 냉난방, 급탕등을 공급할 수 있는 장점을

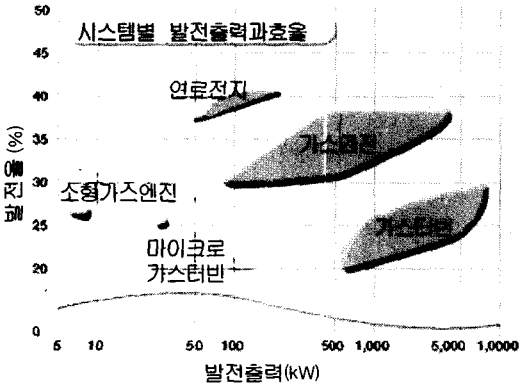
가지고 있다. 가스엔진보다 배열회수율이 크기 때문에, 가스엔진에서 전기를 만드는 것이 메인이라고 한다면 가스터빈은 배열을 유효하게 대량으로 필요로 하는 기기에 보다 적합한 면을 가지고 있다. 배출가스투입형 흡수식 냉동기는 고온재생기에 직접 배출가스를 열원으로 사용하므로 가열 재생할 때 함께 사용되는 가스버너에서 필요로 하는 연료가스를 절감할 수 있다. 2001년 오사카가스(주)그룹의 리키드 가스(주)는 미국캡스톤(주) 제품의 28kW 마이크로 가스터빈에 배출가스투입형 흡수식 냉동기를 조합한 코제네레이션 시스템(조합효율 75%)을 처음으로 발매하여, 2002년 토요타자동차(주)의 자회사인 토요타터빈 앤드 시스템(주)에 의해 마이크로가스엔진(50kW)의 일본생산이 이루어졌고, 산요전기공조(주)와 공동개발을 통해 배기가스 구동시 COP가 1.2인 배출가스 투입형 흡수식 냉동기(그림 10)를 시판하게 되었다. 현재에 이르러 냉동기의 성능개선에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

그 밖의 코제네레이션용 흡수식 냉동수기

냉온수흡수식 냉동기의 경우, 원동기로부터 배출된 온수(80~90℃)를 열원으로 하여, 구동되는 흡수식 냉동기로서 연료전지(PAFC)의 배열을 이용한 업무용 코제네레이션 시스템이 실용화되어 시판되고 있다. 업무용으로 상품화에 성공한 기업으로는 도시바(주), 미츠비시(주), 후지전기(주) 등을 들 수 있는



[그림 10] 배출가스 투입형 흡수식 냉동기(산요전기공조, 냉방능력:52kW)



[그림 11] 발전출력과 효율

며, 연료전지(PAFC)의 발전율은 37%~40%이며 배 열회수율이 40%~50%이다. 연료전지의 크기는 50kW의 용량을 기준으로 W3.1m×D1.75m×H2.5m(후지전기 제품)의 것이 사용되고 있다. 그리고, 냉난방용 냉수·온수 그 밖의 증기(멸균, 가습등)를 필요로 하는 건물의 열원기로 알맞는 증기흡수식 냉동기도 사용되고 있다. 이상, 흡수식을 이용한 코제네레이션 시스템의 연구동향을 간단히 살펴보았다. 그림 11을 보면 일반적으로 발전율(약 25%)이 낮은 가스터빈(마이크로 가스터빈 포함)과 발전용량에 비해 장치의 대형인 연료전지(PAFC)보다는 발전율과 발전용량 상호 밸런스를 갖춘 가스엔진이 향후 코제네레이션 시스템으로서 더욱 보급될 전망이다.

흡수식 냉동기의 향후전망

1959년, 일본에서 단효용 흡수식 냉동기의 제품화 이후, 사회정세와 더불어 흡수식 냉동기의 기술 개발은 계속되어왔다. 21세기로 들어서는, 고효율화, 소형화를 위해 각 구성요소의 전열성능개선과 함께, 1차에너지 절감율의 향상을 도모하는 다양한 코제네레이션 배열 이용기술의 개발 등이 추진되고 있다. 2002년도 기준으로 일본에서 가스 사용에 의한 CO₂배출량을 살펴보면, 2467만톤이 넘는다. 이중에 CO₂억제효과는 334만톤이며, 그 내역으로는 도시가스 기기, 시스템의 고효율화로 13만톤, 코제네레이션의 보급으로 248만톤, 천연가스의 이용촉진으로 73만톤에 이른다. 이러한 수치 중에서 흡수식의 요소기술개발과 흡수식을 이용한 코제네레이션의 효과가 큰 비중을 차지하고 있음은 두말할 필요가 없을 것이다. 일본은 2008년부터 시작되는 선진국간의 CO₂ 배출권 거래를 앞두고 구체적인 사업준비를 진행하고 있다. 여러 가지 의문의 목소리도 없지는 않지만, 일본 국내에서의 CO₂시장은 대략 1조엔의 규모로 불리어지고 있다. 최근 이러한 정세 속에서 흡수식 냉동기의 자리매김을 생각해볼 필요가 있으며, 일본의 냉동공조산업에서 차지하는 흡수식 냉동기의 미래 역할상은 현재보다도 한층 활용도가 증가할 것으로 전망된다. ●