

## 천연냉매를 이용한 열펌프 및 냉동 시스템

### Heat pump and refrigeration systems using natural refrigerants

김 민 수  
M. S. Kim

서울대학교 공과대학 기계공학과



- 1962년생
- 혼합냉매 및 천연냉매를 이용한 열펌프시스템과 냉매의 열역학적 물성에 관심이 있다.

#### 1. 머리말

열펌프는 온도가 낮은 열원으로부터 열을 흡수하여, 온도가 높은 열원으로 열을 방출하는 장치이며, 이러한 작동을 원활히 하기 위해서는 일(work)의 형태로 에너지를 공급하여야 함은 주지하는 사실이다. 이러한 열펌프 사이클과 냉동 사이클은 그 작동원리가 동일하나, 방출되는 열을 이용하는 장치를 열펌프라 하고 저온을 얻기 위해서 대상공간으로부터 열을 제거하는 장치를 냉동기라 부르고 있다. 열역학적 사이클로 구성된 열펌프 및 냉동기에서 열의 흡수 및 방출은 동시에 일어나며, 열펌프의 열흡수 및 냉동기의 열방출은 주로 대기와의 열교환을 통해 이루어진다. 본래 의미로 열펌프는 난방을 위해 설계된 기구이나 실용적으로는 난방이 필요할 때 열펌프 시스템을 이용하여 열을 공급하고, 동일한 시스템을 이용하여 냉방이 필요할 때 실내에서 열을 제거하는 냉난방 겸용기기로 많이 사용된다. 이러한 열펌프 및 냉동기에서는 열을 흡수하거나 방출하기 위한 유체가 필요한데 이를 작동유체(working fluid) 또는 냉매(refrigerant)라 부르고 있다.

천연냉매는 글자 그대로 자연에 존재하는 물질

을 의미하는 것으로서, 인공적으로 만들어 사용해 오고 있는 냉매인 CFC(chlorofluorocarbon), HCFC(hydrochlorofluorocarbon) 및 HFC(hydrofluorocarbon)등과 같은 냉매와 대비되는 개념으로 사용하고 있다. 열펌프 및 냉동기의 작동유체로 사용이 고려되고 있는 물질로는 탄화수소, 암모니아, 이산화탄소, 물, 공기 등을 들 수 있다. 이러한 천연냉매는 CFC 및 HCFC 냉매가 개발되기 이전에 폭넓게 사용되다가, 이들 냉매의 개발과 더불어 사용이 감소하였으며, 최근 들어 이러한 물질들이 다시 거론되고 있는 것은 다름아닌 지구 환경문제 때문이다. 본고에서는 천연냉매의 사용을 고려하게된 배경을 소개하고, 천연냉매로서 위에 언급한 물질들의 특징 및 이를 이용하는 시스템에 관해 간략히 기술하고자 한다.

#### 2. 천연냉매 사용의 배경

환경문제의 하나인 오존층 파괴 및 지구 온난화 등의 문제를 해결하기 위하여, 이에 영향을 미치는 물질들의 생산 및 사용을 규제하고 있다. 기존의 열에너지 이용기기에서 냉매로 널리 사용되어온 CFC 물질은 선진국의 경우 1996년부터

는 사용하지 않고 있으며, 개발도상국에서 필수 용도로 쓰이는 제한된 양만을 생산하여 한시적으로 개발도상국으로 수출하고 있다. 궁극적으로는 이들 냉매를 더이상 생산하지 않기로 국제적인 협약을 맺고 있으며, 그 실행이 전세계적으로 구체화되고 있다[UNEP(1987, 1992)]. 또한 HCFC 물질의 생산 및 사용의 제한도 예정되어 있으며, 현재 선진국의 경우 2030년부터는 사용을 금지하도록 하고 있을 뿐만 아니라, 이들 국가를 중심으로 그 규제의 강도를 높이고 예정된 일정도 앞당기려 하고 있다. 우리나라의 경우에도 1992년 5월 몬트리올 의정서 및 개정 의정서에 가입하였으며, 그 배경으로는 비가입국에 대한 금수조치 등을 들 수 있다.

따라서 규제 대상 냉매에 대한 대체 냉매의 개발은 인류 환경문제를 해결한다는 대명제에 앞서서 냉장고, 에어컨 등에 사용될 작동유체를 마련한다는 데 큰 의미가 있으며, 이러한 대체 냉매를 적용하여야만 제품의 수출이 가능한 실정이다. 현재 사용하고 있는 HCFC 냉매에 대한 대체물질의 개발 및 선정에도 선진국을 중심으로 이미 오래전부터 연구가 진행되어 가시적인 성과가 나타나고 있다. 그 대표적인 것으로 미국냉동협회(ARI)를 중심으로 한 대체냉매 평가프로그램(AREP, alternative refrigerant evaluation program)을 들 수 있다[ARI(1993, 1995)]. 대체냉매로 사용이 가능한 물질들의 선정 작업을 거의 마무리하였으며, 이러한 물질들의 효과적인 생산을 위한 공정의 개발에 박차를 가하고 있다. 아울러 대체물질의 생산에 주도권을 가지고 있는 선진국에서는 대체물질을 상용화하여 전세계를 대상으로한 시장에 공급을 개시한 지 오래이다.

대체냉매의 개발과 더불어 이러한 대체냉매를 이용하기 위한 기술을 확보하는 것이 필요하다. 또한, 새로운 기기의 개발 내지는 기존 시스템의 수정을 통한 신냉매 적용을 도모하는 것도 필요하다. 산업체에서는 대체하려는 냉매와 포화압력이 비슷한 HFC 순수 및 혼합냉매를 한시적인 대체물로 사용하면서, 현재 가동중인 생산 시스템을 최대한 이용하려는 노력을 기울이고 있다. 이와 더불어 대체냉매를 사용하였을 때, 기기의

성능 및 효율을 향상시키는 것은 에너지의 합리적 이용 측면에서 매우 필요하다.

CFC에 대한 대체냉매의 개발 및 선정과정에서 비가연성, 비독성의 안정된 단일성분의 냉매로서 포화증기압이 대체하려는 CFC와 비슷한 냉매를 찾는 데 많은 노력을 기울여 왔다. 포화압력이 비슷한 냉매를 사용할 때 냉매 대체에 따른 제조시설 변환 비용이 최소가 되리라 예상할 수 있다. 가정용 냉장고, 자동차용 에어컨에 널리 사용되던 CFC-12의 경우에는 냉매의 포화압력이 이와 비슷한 단일성분 냉매인 HFC-134a로 그 대체가 이루어지고 있다. CFC-12의 대체냉매로서 등장한 HFC-134a는 가장 성공적인 예로 생각되나 이러한 HFC 계열의 냉매를 냉동사이클에 적용하였을 때 문제가 전혀 없는 것은 아니다. 가장 문제가 되는 것은 압축기의 윤활을 위한 냉동기유(광물유)와의 친화력이 떨어지는 것이다. 최근에 에스텔계의 냉동기유가 개발되었으나 현재로서는 신냉동기유와 신냉매 상호간의 영향 및 시스템에 적용하였을 때의 신뢰성 검증을 하고 있는 상태이다.

가정용 및 산업용 냉방기에 많이 쓰이는 HCFC-22 및 저온용 냉매인 R-502에 대한 대체 냉매로서, 단일성분이며, 이와 포화증기압이 비슷하면서, 냉매가 갖추어야 할 성질들을 고루 갖춘 단일성분의 대체냉매는 현재까지 발견되지 않았다. 따라서, 두가지 혹은 세가지의 HFC 계열냉매를 혼합하여 대체냉매로 사용하려는 움직임이 일고 있다. 혼합냉매를 이용하면, 시스템의 성능향상 및 용량조절 등의 효과를 거둘 수 있는 반면 [Didion and Bivens(1990), Jakobs and Kruse(1979)], 혼합냉매가 본질적으로 다루기 힘들고, 고장, 수리, 보수시에 발생하는 누출로 인하여 성분비의 변동이 생기며, 더우기 재충전시에서도 초기 성분비를 재현하기 힘들기 때문에, 혼합냉매를 기피하는 경향이 있다. 하지만 HFC 계열냉매를 혼합하여 사용하는 것 외에 다른 적절한 대안이 없음을 염두에 두어야 한다.

그러나 HFC 계열 냉매가 오존층에 미치는 영향은 비록 전무하지만, 지구의 온난화에는 영향을 미치는 것으로 알려지고 있기 때문에, 유럽 등

지에서는 환경보호론자들이 HFC 계열의 냉매도 사용하지 말자고 주장하고 있다[Greenpeace (1994)]. 대체물질의 개발이 지구환경보호를 위한 큰 테두리 안에서 이루어져야 한다면 HFC 계열 냉매로의 대체는 최선의 선택이라고는 할 수 없다. 왜냐하면 HFC 계열 냉매 역시 인간이 만든 합성물질로서 오존층을 파괴하지는 않는 것으로 알려져 있지만, 지구온난화 등의 문제를 일으킬 소지가 있기 때문이다. 특히, 최근의 기상 이변 등이 지구온난화에 기인한다고 밝혀지고 있는 실정에서 지구온난화도가 큰 HFC 계열 냉매의 사용은 바람직하지 않다고 할 수 있다. 이러한 문제에 대한 근본적인 해결책은 지구온난화에

영향을 거의 미치지 않는 물질을 냉매로 사용하는 것이며, 그 일환으로 천연냉매의 사용을 적극 고려하고 있다.

냉매를 사용하는 열펌프 시스템에 관련된 연구는 국제 에너지 기구(International Energy Agency)의 열펌프 센터(Heat Pump Center)를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 이는 참가국 사이에 협력을 증진하는 것을 목표로 열펌프 개발을 가속화하고, 효율을 높이는데 초점을 맞추고 있는데, 그 분과의 하나인 Annex 22는 천연냉매를 이용한 압축시스템을 취급하고 있다[Stene (1995)]. 특히 천연냉매로는 자연에 존재하거나 (naturally occurring), 환경에 영향이 없는

표 1 여러 냉매들의 성질

	CFC12	HFC22	HFC134a	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Propane	Water	Air
natural substance?	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
ODP	1.0	0.05	0	0	0	0	0	0
GWP(100 years)	7100	1600	1200	-	1	-	-	-
flammable or explosive?	No	No	No	Yes	No	Yes	No	No
toxic/irritating decomposition products?	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	No
approximate relative price	1	1	3-5	0.2	0.1	0.1	0.01	0.01
molar mass(kg kmol <sup>-1</sup> )	120.92	86.48	102.03	17.03	44.01	44.10	18.02	28.97
NBP at 1.013 bar(°C)	-29.8	-40.8	-26.2	-33.3	-78.5	-42.1	100.0	-
critical parameters : temperature(°C)	112.0	96.2	101.2	132.3	31.1	96.8	374.2	-
pressure(bar)	41.6	49.9	40.7	113.3	73.8	42.5	221.0	-
pressure at 0°C(bar)	3.09	4.98	2.93	4.29	34.85	4.74	0.0061	-
enthalpy of evaporation at 0°C(kJ kg <sup>-1</sup> )	152.5	204.9	198.4	1261.7	231.6	374.4	2502	-
volumetric refrig. capacity at 0°C(kJ m <sup>-3</sup> )	2740	4344	2860	4360	22600	3274	-	-
theoretical cycle COP(0/40°C)	5.62	5.55	5.49	5.73	2.78	6.37	-	-
specific heat at 0°C(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )								
(a) saturated liquid	0.93	1.17	1.34	4.76	2.42	2.51	4.22	-
(b) saturated vapor	0.65	0.72	0.90	2.50	0.58	1.77	1.85	-
thermal conductivity at 0°C(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )								
(a) saturated liquid	0.078	0.100	0.092	0.539	0.105	0.106	0.569	-
(b) saturated vapor	0.008	0.009	0.012	0.022	0.023	0.016	0.018	-
Kinematic viscosity at 0°C(10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )								
(a) saturated liquid	0.192	0.184	0.212	0.303	0.095	0.239	1.750	-
(b) saturated vapor	0.656	0.565	0.880	0.993	0.156	0.752	1.654	-
Isentropic exponent(k), ideal gas	1.14	1.20	1.12	1.31	1.30	1.22	1.33	1.40

(ecologically safe) 물질을 대상으로 하고 있으며, 이에에는 탄화수소, 암모니아, 이산화탄소, 물, 공기, 불활성 기체 등이 포함된다. 이들 천연냉매의 성질을 CFC12, HCFC22, HFC134a와 비교하여 표 1에 나타내었다.

### 3. 천연냉매 및 시스템 응용에

냉매가 환경에 미치는 영향은 여러가지 면에서 고찰할 수 있으나, 대기 중에 방출되어 오존층 파괴 및 지구 온난화 등과 같이 직접적으로 영향을 미치는 것이 가장 우려되는 사항이다. 이러한 측면에서의 환경친화적인 대체 냉매의 선택은 지구생태계의 보존이란 측면에서, 또한 지구 환경의 보전이라는 측면에서 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 여러 천연유체를 가운데 탄화수소, 암모니아, 이산화탄소, 물, 공기 등이 냉매로써 사용이 가능하다. 천연냉매(natural refrigerant)는 환경적인 측면에서 오존층 파괴를 하지 않으며, 지구 온난화에 미치는 영향이 미미하다. 또한 인체에 무해하며, 독성이 없고, 화학적으로 안정하며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 냉동기 유인 광물유(mineral oil)와 잘 혼합된다. 또한 열역학적 물성 및 전달물성이 우수하여 냉동기에 적용할 때 높은 성능계수를 보인다. 더우기 기존 냉동기의 재료를 그대로 사용하는데 문제가 없으며, 무엇보다도 값이 저렴하고, 재생(recycle)하지 않아도 되는 장점이 있다. 이러한 천연냉매의 단점은 역시 안전과 관련된 부분이다. 탄화수소 계열 냉매의 높은 가연성, 암모니아의 가연성과 독성 등이 문제시 되고 있으며, 이산화탄소는 높은 작동압력과 낮은 임계온도로 인해 통상적으로 100 기압가량의 높은 압력에서 초임사이클로 작동된다. 물의 경우에는 이와는 반대로 대기압 이하의 낮은 작동압력이 문제시되며, 현존하는 공기사이클은 낮은 에너지 효율이 단점으로 생각된다. 새로운 냉매로서 이러한 천연냉매를 이용할 때에는 기술적으로 이러한 문제들을 극복할 수 있어야 하며, 구성요소들에 대한 설계, 제작, 설치, 작동에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 본 절에서는 위에 언급한 다섯가지 냉매의

특징과 이를 이용한 시스템에 관해 기술한다.

#### 3.1 탄화수소(Hydrocarbons)

미국을 비롯한 북미 지역에서는 가연성을 지니는 냉매를 사용하는 것이 허용되지 않고 있으나 독일을 비롯한 유럽국가들에서는 HFC 계열의 순수 및 혼합 냉매의 지구온난화 효과를 환경문제로 거론하면서, 지구온난화 효과가 없는 탄화수소 계열 냉매의 사용을 적극 고려하고 있다 [James and Missenden(1992), Kramer(1991), Kruse(1996)].

탄화수소는 탄소와 수소로 이루어진 화합물을 의미하며, 냉매로 주로 거론되고 있는 것은 프로판, 이소부탄, 부탄 등의 순수 냉매 및 이들의 혼합냉매이다. 프로판이나 이소부탄의 경우 R12와는 다른 열물성을 가지고 있으므로 기존의 냉동기에 그대로 적용하기는 어렵다고 생각되며, R12의 성능에 근접하는 탄화수소계열의 혼합냉매에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 혼합냉매를 사용할 경우 응축 및 증발시 온도가 변하는 특성에 따라 냉매의 열전달특성이 동일하다면 증발기에서는 냉매의 평균온도를 높여주고, 응축기에서는 평균온도를 하강시켜 성능이 향상된다고 알려져 있다[Bodio et al.(1993, 1994, 1995), Hesse and Arne-mann(1994), Hewitt et al.(1994), Rader-macher(1994), Rives and Bidone(1994), Vollmer and Findeisen (1994)]. 초기에는 프로판과 이소부탄의 혼합물을 냉매로 사용하여, 증발 및 응축시의 온도 변화를 이용해 사이클의 성능을 향상시키기 위한 설계를 하였으며 현재에 소형냉장고의 냉매로 이소부탄을 사용하기도 한다.

에어컨에 사용되고 있는 R22와 포화압력이 비슷한 프로판을 적용하기 위한 시도는 여러 제조사를 중심으로 다각적으로 진행되고 있다. 특히 프로판은 석유화학산업의 대용량 냉동기 냉매로 오래동안 쓰여져 왔다. 프로판의 열역학적 성질 및 전달 성질은 매우 우수하나, 가연성이 높아 폭발, 화재의 위험이 있다고 생각된다. 따지고 보면 가연성 물질은 우리 주위에 매우 많으나, 가연성이 있다고 하여 항상 문제가 생기는 것은

아니다. 프로판과 같은 탄화수소 냉매를 사용할 때에 가장 문제시 되는 것은 가연성인데, 이에 관해서도 많은 논란이 일고 있다. 주방용의 가스 레인지 등의 개방 시스템에서 사용하고 있는 연료로서의 프로판과 거의 완벽하게 밀폐된 냉동기 내의 프로판을 동일한 위험성을 가지고 보는 것은 무리이다. 물론 가연성이 없는 냉매를 사용하는 경우와 비교하면, 가연성 있는 냉매를 사용할 때에 주의를 기울여야 하는 것은 사실이다[Cavallini(1995)]. 예를 들어 이음매 부분을 용접하고, 가능하면 실내공간과 격리시키는 것이라든지, 정지시에 냉매를 실외기 쪽으로 이동시키는 것, 전원 스위치 등의 전기 부품을 따로 설치하는 것 등이 요구된다. 또한 팽창장치로 사용되는 모세관의 두께를 늘이는 것, 화재시에 냉매를 효과적으로 실외로 배출시키는 것, 공기보다 무거운 프로판의 누출 시에 냉매가 모여 있지 않도록 설계하는 것 등도 필요하다. 무엇보다도 현재로서는 위와 같은 설계 변경을 하면서 프로판을 사용하는 것보다는 비가연성의 HFC 혼합냉매(예를 들면 R407C)를 사용하는 것이 비용이 적게 든다는 이유 때문에 현재로서는 프로판을 이용하는 에어컨 또는 열펌프의 개발이 답보상태에 있다. 냉매로서의 프로판의 안전성에 대한 실험을 엄밀히 수행한 결과, 폭발이나 화재의 위험은 매우 적다는 결과도 제시되고 있는데, 연료로서의 프로판과 냉매로서의 프로판은 다른 각도에서 지켜 봐야 할 것이다[James and Missenden(1992), Granryd and Tengblad(1994), Van Gerwin and Jansen(1994)].

탄화수소는 높은 가연성으로 인하여[Richard and Shankland(1992)] 간단하며 잘 밀폐되어 있는 시스템에 그 사용이 국한된다. 가정용 냉장고의 냉매로서 탄화수소는 유럽의 각국에서는 폭넓게 받아들여지고 있으며, 독일을 비롯한 몇 나라에서 현재 이소부탄(또는 프로판과 이소부탄의 혼합물)을 작동유체로 사용하는 소형 가정용 냉장고를 상용화하여 생산하고 있다. 현재까지 약 500만대의 탄화수소 이용 소형 냉장고가 유럽지역에 보급되어 있다. 이러한 냉장고에서 탄화수소의 충전량은 대략 50g 정도로 소량이며,

이는 스프레이등의 분사제에 사용되는 양보다 적은 양이다. 기존의 냉동기들이 밀폐형 압축기를 채용하고 있으므로 누출의 가능성은 작고, 기존 냉매에 비해 그 충전량이 줄어들어 비록 누출된다 하더라도 그 위험성은 많지 않다고 보인다. 상업적인 면에서 몇몇 시스템들은 간접적인 방법으로 생각하고 있는데, 이 또한 안전을 고려한 대책이라고 볼 수 있다. 즉, 탄화수소 냉동기의 증발기에서 브라인을 이용해 열교환을 하게 하고, 이를 대상공간으로 보내어 냉각을 한다.

전세계적으로 냉매 생산국은 그리 많지 않으며, 선진국의 몇 개 냉매제조회사들이 전세계 시장 석권을 위한 각축을 벌이고 있다. 그러나, 이러한 탄화수소 계열 냉매는 세계 도처에 존재하므로 구하기가 쉽기 때문에 이를 냉장고와 같은 열에너지 이용기에 적용하기 위한 연구가 시급히 수행되어야 한다. 더우기 탄화수소 계열의 냉매의 사용은 선진국 및 제3세계 국가들에서도 늘어날 것으로 전망된다.

### 3.2 암모니아(Ammonia)

암모니아는 과거 100년 이상 냉동기의 냉매로 사용되어 왔기 때문에 기술 수준도 매우 높고 관련 경험도 상당히 많은 편이다. 암모니아가 지닌 독성 및 가연성 때문에 초기의 암모니아 이용 시스템에서 잦은 사고도 있었으나, CFC 및 HCFC 계열의 냉매가 등장하고서도 상당 기간 사용되어 왔다. 최근들어 대체냉매의 하나로서 그 적용 가능성이 다시 거론되고 있는데 이를 위해 과거의 시스템보다 암모니아의 충전량을 줄이도록 설계하고, 직접 냉각 방식보다는 간접냉각 방식을 택하면 안전성이 현격히 상승되기 때문이다.[Eggen et al.(1994)]. 세계적으로도 냉동 창고용 냉동 시스템의 작동유체로 널리 사용되고 있음은 주지할 만한 사실이다. 열역학적 성질도 우수하고, 전달물성도 좋은 편이며, 윤활 문제도 쉽게 해결될 뿐만 아니라, 가격도 저렴하다. 암모니아의 독성과 미약한 가연성 때문에 사고도 있었지만, 공기보다 가볍고, 냄새가 나는 특징 때문에 미연의 사고는 쉽게 감지하여 방지할 수 있었다. 암모니아의 이러한 성질 때문에 그림 1에 나타낸

바와 같이 2차유체를 이용한 간접냉각 방식을 도입하여 암모니아 냉동사이클을 외부의 특정지역내에 설치함으로써, 비교적 안전하게 사이클을 운전할 수 있다[Nyvad and Lund(1996)]. 적절히 환기가 이루어지는 영역에서 냉동기를 작동시키며, 실내와 떨어뜨려 기계실을 설치함으로써, 안전을 도모한다. 만약 암모니아가 새는 경우에는 암모니아를 안전하게 밖으로 배출할 수 있어야 하며, 특별한 흡수시스템을 통하여 배출하는 방법도 이용되고 있다.

### 3.3 이산화탄소 (Carbon Dioxide)

이산화탄소는 1800년도 후반부터 냉매로 널리 쓰여져 왔다. 이산화탄소의 무해성 때문에 선박용으로 많이 사용되었으며, 프레온 냉매가 등장한 이후에는 그 사용이 급격히 감소하였다. 표1에서 보는 바와 같이 지구온난화에 미치는 영향은 CFC, HCFC 및 HFC 보다 무척 작으며, 오히려 대기중의 이산화탄소를 냉매로 이용함으로써 대기중 이산화탄소의 농도를 감소시키는 효과가 있다. 이산화탄소는 무독성, 비가연성의 환경친화적인 냉매로 냉동기유 및 일반 기기재료와도 호환성이 좋다. 이산화탄소는 임계압력이 약 74bar이고, 임계온도는 약 31°C로서 대기와 열교환을 할 때 임계점 보다 높은 온도에서 열교환을 하여야 한다. 그러므로 초임계압력에서 냉각을 하게되고, 이때 큰 온도하강을 고려하여야 하며, 효율적인 에너지 사용을 위한 방안을 모색하여야 한다. 이산화탄소를 작동유체로 할 때 압력이 기존의 증기 압축 냉동시스템보다 매우 높아지는 것을 알 수 있다. 이런 이유로 적절한 장치

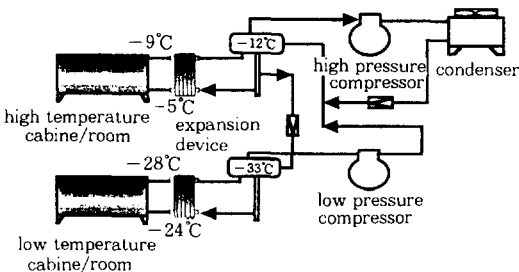
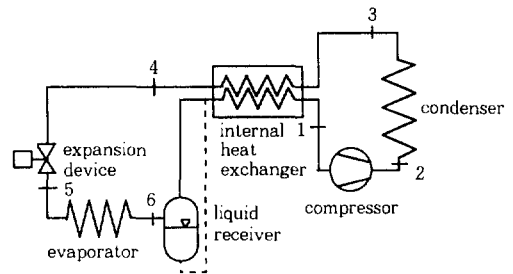


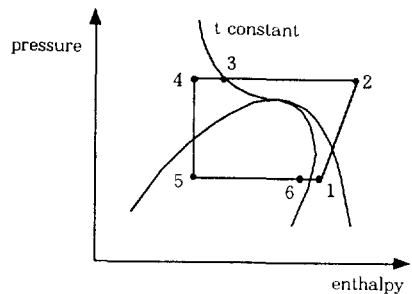
그림 1 암모니아 이용 2단 압축시스템

의 설계가 요구된다. 높은 압력이 약점이지만 긍정적인 면도 있다. 예를 들면 장치를 소형화할 수 있고, 낮은압축비로 인해 압축효율을 향상시킬 수 있다[Lorentsen and Pettersen(1993), Lorentsen(1993), Lorentsen(1994), Pettersen(1995)].

그림 2 에 나타낸 것은 이산화탄소를 냉매로 사용하는 새로운 시스템의 개략도 및 압력-엔탈피 선도 피 선도 상에 표시한 사이클이다. 자동차용 에어컨을 목표로 연구되고 있는 이 시스템은 응축기의 압력이 높아지면 높아질수록, 냉동용량이 증가하는 특성을 보이며, 이는 자동차 에어컨의 초기 구동시 큰 냉각효과를 얻어 냉각에 소요되는 시간을 단축할 수 있는 장점이 된다. 저압부의 액체 분리기 및 내부 열교환기를 설치함으로써 증발기내에 액상이 많이 존재하게 하여 열전달을 촉진시키고, 냉매 충전량을 조절하며, 냉매의 누출도 일정기간 보상할 수 있다. 또한 액체 분리



(a) 이산화탄소 이용 냉동사이클의 개략도



(b) 이산화탄소 이용 사이클의 압력-엔탈피 선도

그림 2 이산화탄소 이용 냉동사이클의 개략도 및 압력-엔탈피 선도

기의 하단부에서 냉동기유를 압축기로 보낼 수 있으며, 시스템 내의 압력이 급격히 상승하는 것을 방지하는 역할도 한다.

급탕용 열펌프를 생각한다면, 2단 압축을 통하여, 각 압축기에서의 압력비를 낮추고 압축기 출구 최고온도도 낮출 수 있다. 지역난방에 사용될 수 있는 이산화탄소 이용 2단 압축 열펌프 시스템을 그림 3에 나타내었다. 초임계사이클로 작동되는 이 사이클은 R12를 이용하는 사이클과 비교하여, 소요동력이 절감되고, 압축기 효율도 상승되며, 열교환과정에서의 평균온도차를 줄이는 장점이 있지만, 팽창과정에서의 손실은 상대적으로 커진다. 상용화된 이산화탄소 이용시스템은 수퍼마켓과 같이 2개의 서로 다른 온도가 필요한 곳의 냉동시스템으로 설치된 바 있다. 이러한 시스템에서 응축기의 크기가 증기압축냉동사이클 보다 커지는 단점이 있다[Loretsen and Pettersen(1993)].

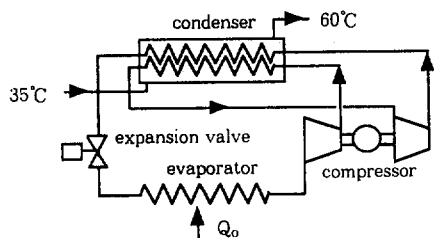


그림 3 이산화탄소 이용 2단 압축 열펌프 사이클

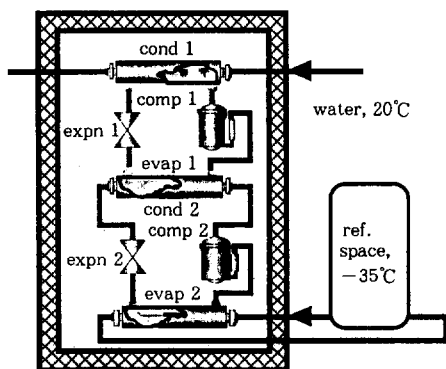


그림 4 이산화탄소 이용 다단 냉동시스템

이산화탄소를 순수냉매로 사용하는 대신 다른 방법으로 이를 이용하는 방법도 있다. 적절한 안전조건하에 암모니아나 프로판올 사용하는 냉동 시스템에서 부분적으로 응축되는 상변화를 동반한 혼합냉매의 한성분 냉매로서 이산화탄소를 사용하는 것도 생각할 수 있으며, 그림 4에 나타낸 것과 같이 다단냉동시스템의 하부사이클을 이루는 것도 좋은 방법이다[Infante Ferreira and Boukens(1996)]. 그 외에도 이산화탄소를 이용한 흡수식 시스템을 구성하는 것도 생각할 수 있다.

### 3.4 물(Water)

물은 공기조화용 칠러와 같이 빙점 이상에서 작동하는 증기 압축식 시스템의 냉매로 사용될 수 있다. 물론 증발압력은 매우 낮으며, 작동 압력비도 높은 편이다. 응축압력도 대기압보다 낮으므로 전체 시스템이 진공상태에서 작동하는 것이 특징이며, 이에 따른 시스템으로의 공기 유입 등이 문제시 된다. 지역난방을 위한 시스템 및 광산 냉각 등에 응용되고 있으며, 또한 이러한 사이클은 유기용제의 회수에도 이용되고 있는 등, 물을 냉매로 사용하는 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[Koren and Ophir(1996), Madsboll and Minds(1996), Yuan and Blaise(1988), Prasad(1992), Van Orshoven et al.(1993), Paul(1994), Albring(1994), Madsboll et al.(1994)]

물을 냉매로 사용하는 데에는 몇가지의 문제점이 존재한다. 그 대표적인 것으로는 작동압력이 매우 낮은 것을 들 수 있는데, 이 때문에 저온에서도 기상의 비체적이 매우 크고 기존냉매의 체적냉동용량보다 매우 낮은 값을 가진다. 체적식 압축기를 사용할 때 거대한 행적체적이 필요하며, 따라서 터보압축기 혹은 특별히 제작된 로터리방식의 사이클로이드 압축기 등을 사용하여야 한다.

물을 이용한 증기압축 냉동 시스템은 증발기와 응축기에서 직접 접촉방식으로 열전달을 하는 개방형으로 만들어질 수도 있다. 이 시스템은 기존의 열교환기에서 유한 온도차로 인해서 발생하는 에너지 손실을 감소시켜 주며, 따라서 기기의 수

명을 생각할 때, 초기의 투자비가 많은 것을 낮은 운전비로 보상할 수 있다. 수증기냉동시스템에 사용되는 압축기의 소요 동력은 약 500~5000kW, 압축비는 약 3~10으로 오늘날 산업 현장에서 상업적으로 사용되고 있으며, 이러한 몇몇 플랜트는 최근에 만들어져서 만족스럽게 작동되고 있다. 증발기 온도가 0°C에서 20°C 범위의 칠러로서 많이 응용되고 있으며, 물의 삼중점 이하에서 얼음죽(ice slurry)을 만들어 이를 직접 냉방용으로 사용하기도 한다. 이는 새로운 관심영역으로서 미세한 얼음결정으로 이루어진 얼음죽의 형태로 높은 에너지밀도를 가진 2차냉매를 만들어 사용하는 것이며, 이것은 수증기 냉동플랜트의 증발기에서 직접적으로 얻을 수 있다.

물을 냉매로 이용하는 시스템을 그림 5에 나타내었다. 이 과정은 1차 냉매 및 2차 냉매(2차 열교환 유체)가 모두 물이며, 열교환기가 없다는 것이 특징이다. 물이 13.5°C로 증발기에 공급되는데 여기서 감압되어 압력이 약 11mbar로 되고, 이때 포화온도는 약 8°C가 된다. 약 1%의 물이 증발하고 남은 99%의 물은 약 9°C로 냉각된다. 증발한 물은 주냉매(1차 냉매인 작동유체)가 되어 2단 압축과정을 거친다. 이 과정에서 대부분 2단 압축을 하게 되는데 이는 반경류 원심압축기를 사용하는 실제 시스템에서 큰 압력차(큰 온도차)를 얻기 위함이다. 응축기에서는 수증기가 직접 분사되는 냉각수와 섞이며 응축온도에 다르다. 이러한 사이클 운전중에 유입되는 불응축 기체는 응축기에 도달하기 전에 효과적으로 제거하여야 한다.

진공을 이용한 얼음죽 제조시스템을 그림 6에 나타내었다. 얼음죽은 냉동실에서 생성이 되는데 이는 그림 7에 나타낸 바와 같이 삼중점 이하에서 얼음결정이 생성되는 원리를 이용한 것이다 [Zakeri(1996)]. 기체상태의 수증기는 압축기에서 2단 압축되는데 1단에서 압축된 기체는 냉각수와 직접 접촉하여 1차 냉각되고 다시 2단에서 압축된다. 직접접촉 방식을 이용한 응축기에서 응축된 물은 냉각탑에서 냉각된다. 얼음죽은 얼음분리기(ice concentrator)에서 분리되어 냉각이 필요한 공간으로 직접 보내지고, 열교환후 액체로된 물은 다시 회수된다. 이 경우 주로 소금물이 사용되는데 이는 소금물의 삼중점이 순수물의 삼중점 보다 낮아 저온을 얻는 것이 수월하기 때문이다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 증발과정에서 일부의 물이 증발하게 되면, 이 때의 증발잠열을 아직 증발하지 않은 액체로부터 흡수하

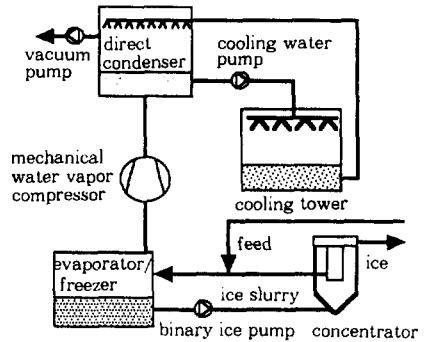


그림 6 얼음죽 제조를 위한 수증기 압축 냉동 시스템

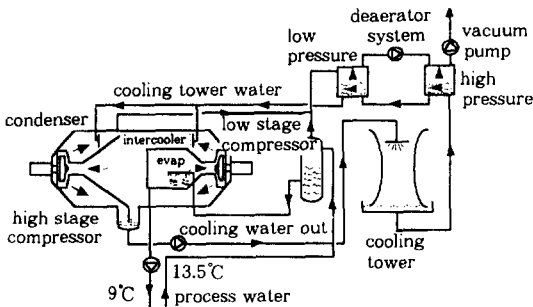


그림 5 물 이용 2단 냉동시스템

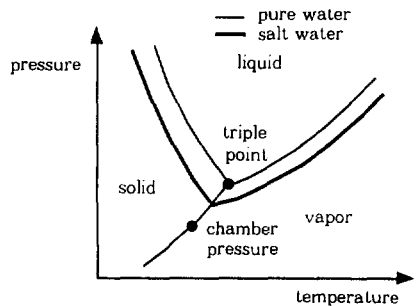


그림 7 물 및 소금물의 상평형도



게 되고, 온도를 떨어뜨려 얼음 결정을 만든다. 통상 얼음의 생성량과 증발량을 비교하면 약 7:1 가량 된다. 이 때에 저압을 유지하고, 큰 비체적의 수증기를 다루기 위해서는 특별한 압축기가 필요하며, 비교적 대형의 압축기를 사용하는 경우의 기계적인 문제들이 해결되어야 한다.

### 3.5 공기(Air)

공기를 냉매로 사용하는 것은 어제, 오늘의 일은 아니며, 비행기의 실내 공간 냉방에 널리 이용된 것은 주지하는 사실이다. 공기를 이용한 냉동시스템은 고압의 공기가 가역단열 팽창할 때, 온도가 떨어지는 현상을 이용하는 것이다. 사이클의 작동 조건에 따라 열펌프 또는 냉동기로 사용될 수 있으며, 저온을 얻는데에도 응용되고 있다. 단점이라면, 증기압축식 냉동기 보다는 공기 냉동 사이클의 성능이 떨어진다는 것을 들 수 있다. 즉, 증기압축 냉동사이클에 비교하여 공기압축 냉동사이클은 이론적인 성능계수가 낮으나, 이러한 단점은 실제의 열교환 과정에서 유한한 열교환기 면적과 2차 유체의 온도변화를 고려하여 열교환시의 온도 구배 맞춤을 통해 어느정도 보상을 할 수 있다.

그림 8에 나타난 공기 압축 냉동 시스템은 자동차용 냉방시스템을 공기 압축 사이클로 구성한 예를 나타내고 있다. 압축기 소요 동력은 배기가스의 운동에너지를 이용하는 대신에 엔진으로부터 직접 공급한다. 엔진 구동력으로 작동하는 발전기를 사용하여 전기를 만들고 압축기를 구동하여 대기로부터 공기를 빨아들여 압축하는 방법도 생각할 수 있다. 중간냉각기에서 대기온보다 높

은 열교환 부분은 대기를 이용하여 냉각하고, 그 후 저온 공기를 이용하여 더 냉각시킨 후, 팽창 터빈으로 보낸다. 팽창을 한 후의 저온 공기는 항공기의 경우 직접 실내로 공급하지만, 이 경우에는 실내공기와 냉매공기를 분리시키기 위해 열교환기를 사용하고 있다. 공기를 대기로부터 유입시키는 시스템에서 주의하여야 하는 범 중의 하나는 공기중의 수분이다. 저온의 공기가 생성되면서, 응축수가 생기는 문제점이 있으며, 이렇게 응축된 응축수를 잘 처리하여야 한다[Fitt(1996)].

독일에서는 고속철도(ICE)의 냉방시스템으로 공기 사이클을 채택하여 1995년 이후 성공적으로 사용하고 있다. 그림 9에 나타난 시스템이 바로 이 시스템인데 증기압축 사이클과 비교하여 크기도 비슷하고, 가격이나 중량면에서도 거의 동일한 수준이다. R134a를 사용하는 시스템에 비교하여 소요 에너지는 조금 많으나, 환경에 미치는 영향은 매우 작아졌다. 이러한 공기를 사용하는 시스템의 장점으로 들 수 있는 것은 유지보수에 드는 비용이 상당히 경감된다는 것이다. 이러한 공기압축 냉동시스템의 보급을 위해서는 수만 rpm으로 회전하는 구동모터의 개발이 필수적이라 할 수 있다[Kruse(1996)].

공기사이클이 표준온도범위에서 작동하는 기존의 시스템과 비교하여 경쟁력이 있기 위해서는 에너지 이용 효율의 향상이 필요하다. 이러한 에너지 이용 효율의 향상은 성능좋은 구성장치(압축기, 팽창장치, 열교환기 등)를 사용한다든지 혹은 개방시스템, 재생열교환기, 다단 압축팽창, 습기의 효율적인 이용을 포함하는 방안을 강구함

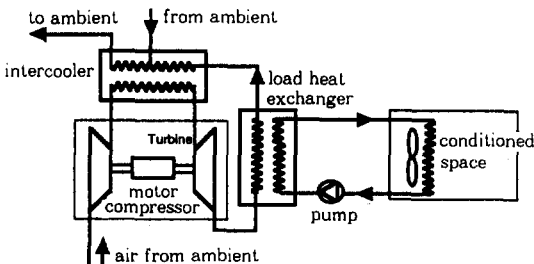


그림 8 공기 압축 냉방시스템

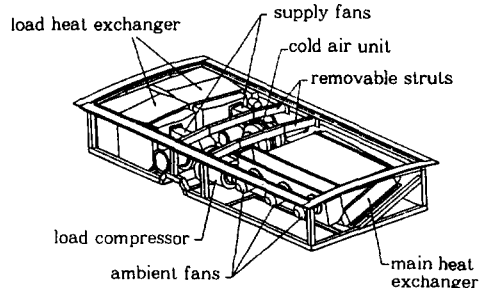


그림 9 고속철도용 공기 압축 냉방시스템

으로써 이루어질 수 있다. 이러한 공기압축 냉동 사이클은 건물의 공기조화 시스템으로 이용가능성도 매우 높다. 이 경우 냉방, 난방 뿐만 아니라, 환기 등을 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있다[Van Gerwin and Verschoor(1996)]. 이러한 공기 이용 냉동 사이클은 극저온 시스템, 식료품의 냉동 운반, 식품냉장, 냉난방부하를 동시에 가지는 플랜트, 자동차나 기차의 공기조화 등에 효과적으로 이용될 수 있다.

#### 4. 맺음말

지금까지 천연냉매를 이용하는 열펌프 및 냉동 사이클에 대하여 간략히 고찰하여 보았다. 흔히 CFC 냉매 또는 HCFC 냉매의 대체물을 나열하라고 하면, 흔히 HFC 냉매를 거론하게 된다. 그러나 유럽의 여러나라에서는 이미 오래전부터 HFC 냉매의 지구 온난화 효과를 문제삼아 영원한 대체물로 생각하지 않고 있으며, 미국에서도 천연냉매에 뒤늦게 관심을 갖는 연구자들이 많이 생겨났다. 천연냉매는 글자 그대로 자연에 존재하는 물질로서 CFC 및 HCFC 냉매가 개발되기 이전에 많이 사용되다가 이들 냉매의 개발과 더불어 사용이 급격히 감소하였다. 최근 들어 이러한 물질들이 다시 거론되고 있는 것은 다름아닌 지구 환경문제 때문이며, 이러한 추세를 면밀히 고찰하여 천연냉매 이용 시스템에 관심을 갖는 것은 시의 적절하다 하겠다.

#### 참 고 문 헌

1. Albring, P., 1994, Water as Refrigerant in Refrigeration Plants with Mechanical Compression, Proc. New Applications of Natural Working Fluids in Refrigeration and Air Conditioning, Hannover, pp.735~742.
2. ARI, 1993, Results from ARI's R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program(AREP), Arlington, VA, U.S.A., Vol. 1~3.
3. ARI, 1995, Alternative Refrigerants Evaluation Program(AREP) Technical Committee Meeting, January, Chicago, IL, U. S.A.
4. Bodio, E., Chorowski, M., and Wilczek, M., 1993, Working Parameters of Domestic Refrigerators Filled with Propane-Butane Mixture, Int. J. Refrig., Vol. 16, No. 5, pp. 353~356.
5. Bodio, E., Chorowski, M., and Wilczek, M., 1994, Propane-Butane : An Environmentally Friendly Refrigerant, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.571~578.
6. Bodio, E., Chorowski, M., and Wilczek, M., 1995, Propane-Butane a Promising Alternatives, 19th International Congress of Refrigeration, Hague, Netherlands, August 20-25, Vol. IVb, pp.762~765.
7. Cavallini, A., 1995, Working Fluids for Mechanical Refrigeration, Proceedings of the 19th International Congress of Refrigeration, The Hague, The Netherlands, Vol. IVa, pp.25~42.
8. Didion, D. A. and Bivens, D. B., 1990, Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs, Int. J. Refrig., Vol. 13, pp. 163~175.
9. Eggen, G., Lystad, T., and Fagerli, B. E., 1994, Design Criteria for Heat Pumps and Refrigerating Plants with Ammonia and Flammables Working Fluids, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Padova, Sept., pp.337~334.
10. Fitt, P. W., 1996, A Practical application of the Joule Air Cycle to Vehicle Air Conditioning, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigeration, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp.667~676.
11. Granryd, E. and Tengblad, N., 1994, Pro-

- pane as Refrigerant in a Small Heat Pump. Safety Considerations and Performance Comparisons., IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.355~364.
12. Greenpeace, 1994, Hydrocarbons-High Tech in Refrigeration, Hamburg, Germany.
  13. Hesse, U. and Arnemann, M., 1994, Carbon Dioxide-Hydrocarbon Mixtures as Alternative Fluids in Refrigeration Systems, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.711~720.
  14. Hewitt, N. J., McMullan, N. J., and Mongey, B., 1994, Some Aspects of Using Hydrocarbons as Components in Refrigerant Mixtures, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.143~152.
  15. Infante Ferreira, C. A. and Boukens, R. A., 1996, Carbon Dioxide-Secondary Coolant or Refrigerant for Cascade Systems?, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp. 185~194.
  16. Jakobs, R and Kruse. H., 1979, The Use of Non-azeotropic Refrigerant Mixtures in Heat Pumps for Energy Saving, Int. J. Refrig., Vol. 2, pp.29~32.
  17. James, R. W. and Missenden, J. F., 1992, The Use of Propane in Domestic Refrigerators, Int. J. Refrig., Vol. 15, No. 2, pp. 95~100.
  18. Koren, A. and Ophir, A., 1996, Water Vapor Technology: Application to Commercially Operating Equipment, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp.559~566.
  19. Kramer, D., 1991, Why Not Propane?, ASHRAE J., Vol. 33, No. 6, pp. 52~55.
  20. Kruse, H., 1996, Current Status of Natural Working Fluids in Refrigeration, A/C, and Heat Pump Systems, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp. 49~64.
  21. Lorentzen, G. and Pettersen, J., 1993, A New, Efficient and Environmentally Benign System for Car Air-Conditioning, Int. J. Refrig., Vol. 16, pp.4~12.
  22. Lorentzen, G., 1993, Application of "Natural Refrigerants", IIR Commission B1 & B2, Ghent, Belgium, pp.55~64.
  23. Lorentzen, G.1994, Revival of Carbon Dioxide as a Refrigerant, Int. J. Refrig., Vol. 17, pp.292~301.
  24. Madsboll, H. and Minds, G., 1996, A 2MW Industrial Chiller Using Water as Refrigerant. Principles and Operational Experiences, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp.567~576.
  25. Madsboll, H., Minds, G., Nyvad, J., and Elefsen, F., 1994, The State of Art for Water Vapour Compressors and Cooling Plants using Water as Refrigerant, Proc. New Applications of Natural Working Fluids in Refrigeration and Air Conditioning, Hannover, pp.743~754.
  26. Nyvad, J. and Lund, S., 1996, Indirect Cooling with Ammonia in Supermarkets, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp.207~217.
  27. Paul, J., 1994, Water as Natural Refrigerant, Proc. New Applications of Natural Working Fluids in Refrigeration and Air Conditioning, Hannover, pp.97~108.
  28. Pettersen, J., 1995, Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Systems Based on CO<sub>2</sub>, Workshop Proceedings-

- Compression Systems with Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, pp.163~180.
29. Prasad, M., 1992, Multi-Stage Water and Ammonia Refrigeration Systems in the Light of Ozone Hole Problem, Proc. Int. Ref. Conf., Purdue Univ, Indiana, U.S.A.
  30. Radermacher, R., Tomasek, M.-L., and Liu, B. Y., 1994, Test with R290/R600 Mixtures in a Domestic Refrigerator/Freezer, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.579~588.
  31. Richard, R. G. and Shankland, I. R., 1992, Flammability of Alternative Refrigerant, ASHRAE J., Vol. 34, No. 4, pp.20~24.
  32. Ravis, E. and Bidone, A., 1994, Isobutane-Propane Mixtures: Comparison with Traditional and Non-traditional Refrigerants, IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, Padova, Sept., pp.345~354.
  33. Stene, J., 1995, Refrigeration, International Status, Workshop Proceedings-Compression Systems with Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, pp.11~24.
  34. UNEP, 1987, Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.
  35. UNEP, 1992, Copenhagen Decision, The Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol.
  36. Van Gerwin, R. J. M. and Jansen, C., 1994, Risk Assessment of Flammable Refrigerants, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.425~432.
  37. Van Gerwin, R. J. M. and Verschoor, M. J. E., 1996, Feasibility of Air Cycle Systems for Building air Conditioning Systems, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp. 677~685.
  38. Van Orshoven, D., Klein, S. A., and Beckman, W. A., 1993, An Investigation of Water as a Refrigerant, J. of Energy Resourced Tech., Vol. 115, pp.257~263.
  39. Vollmer, D. and Findeisen, E., 1994, Calculation of Thermodynamic and Thermophysical Properties of the Binary Mixture Propane/Isobutane, IIR Commission B2, Hannover, Germany, May, pp.119~130
  40. Yuan, Q. S. and Blaise, J. C., 1988, Water - A Working Fluid for CFC Replacement, Int. J. Ref., Vol. 11, pp.243~247.
  41. Zakeri, G. R., 1996, A New Vacuum Freese System Design for Energy Effective Production of Ice Slurry, IIR Commissions B1, B2, E1 & E2, Applications for Natural Refrigerants, Aarhus, Denmark, Sep. 3~6, pp.585~591.