

일본의 CO₂ 냉매를 이용한 열펌프급탕기 개발 동향

냉매로서 이산화탄소의 특성에 관하여 고찰하고, 일본의 CO₂ 냉매를 이용한 열펌프급탕기의 기술 개발동향 및 시장 현황을 간략히 소개하고자 한다.

김 만 회

삼성전자 DA총괄 기반기술연구팀 (manhoe.kim@samsung.com)

지구의 오존층을 보호하기 위한 몬트리올 의정서가 1987년 채택된 이후 오존층 파괴물질의 사용이 점차 감소되고 있다. 선진국의 경우 1995년 말부터 CFC냉매의 생산을 전폐하였고, HCFC냉매의 경우는 2020년 전폐를 목표로 대체냉매를 이용한 응용 기술개발 및 제품 생산이 진행되고 있다. 가정용 냉장고 및 차량용 에어컨에는 R-12의 대체냉매로 R-134a가 도입되었으며, 유럽을 중심으로 냉장고에는 HC계 냉매인 R-600a도 대체냉매로 사용되고 있다. 가정용 에어컨에는 혼합냉매인 R-407c 와 R-410a 가 R-22 냉매를 대체하여 적용되고 있다. 그러나, 현재 CFC 및 HCFC 대체냉매로 많이 사용되고 있는 HFC계 냉매도 지구 온난화 지수가 대단히 큰 문제를 가지고 있다. 1997년에 채택된 교토의정서에는 HFC계 냉매가 온실효과 가스의 배출규제물

질에 포함되어 있다. 이에 따라서 오존층 파괴지수가 영이고 지구온난화지수도 거의 없는 자연냉매가 주목을 받게 되었으며, 자연냉매의 하나인 이산화탄소 (CO₂, R744) 냉매의 응용기술 및 제품개발 연구가 선진국을 중심으로 폭넓게 진행되고 있다.

본 고에서는 CO₂ 냉매의 일반적 특성을 간단히 소개하고 일본에서 진행되고 있는 CO₂ 냉매를 적용한 급탕시스템의 제품개발 및 시장현황에 대해서 기술하기로 한다.

CO₂냉매의 특성

표 1에 여러 가지 냉매의 일반적 특성을 CO₂ 냉매와 비교하여 나타내었다. CO₂ 냉매는 새로운 냉매가 아니다. CO₂ 냉매는 1860년대 후반부터 제빙

<표 1> CO₂ 냉매의 일반적 특성

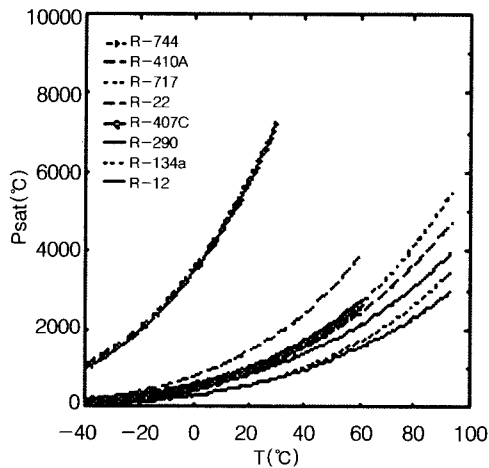
항목	R-12 CFC	R-22 HCFC	R-134a HFC	R-410a HFC (HFC 혼합물)	R-717 NH3	R-290 C3H8	R-744 CO2
화학성분	CCl ₂ F ₂	CHClF ₂	CH ₂ FCF ₃	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	NH ₃	C ₃ H ₈	CO ₂
ODP-GWP	1/7100	0.05/1500	0/1200	0/1730	0/0	0/3	0/1
가연성/독성	N/N	N/N	N/N	N/N	Y/Y	Y/N	N/N
가격(상대값)	1	1	3-5	5	0.2	0.1	0.1
분자량(kg/kmol)	120.9	86.5	102.0	72.6	17.0	44.1	44.0
비등점(°C)	-29.8	-40.8	-26.2	-52.7	-33.3	-42.1	-78.5
임계온도(°C)	112.0	96.2	101.2	72.1	132.3	96.7	31.1
임계압력(MPa)	4.16	4.99	4.07	4.95	11.33	4.24	7.38
냉동능력(kJ/m ³)	2734	4356	2668	6763	4382	3907	22545
상용화/규제시점	1931/1995	1936/2029	1990/-	1998/-	1859/-	-/-	1869/-



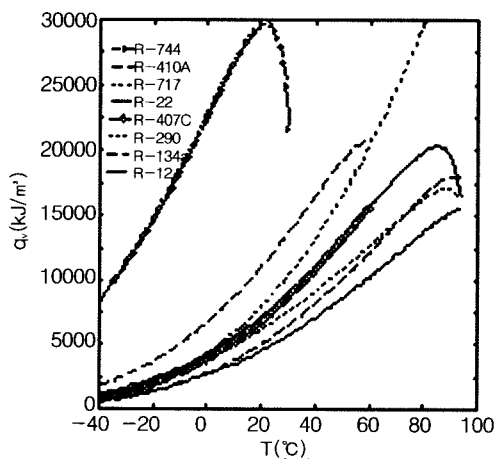
기 등에 사용되기 시작하여, 1930년대 초에 CFC 및 HCFC물질이 개발되기 전까지는 냉매로 널리 사용되었다. 그러나, 냉매의 특성상 고압이고 주위 온도가 높을 경우 성능이 저하하는 문제 등으로 CFC/HCFC 물질로 대체되었다. 그 후 다시 CFC/HCFC 물질이 오존층파괴물질로 규제되기 시작하면서 자연냉매에 대한 관심이 증가하였고, 1989년에 Gustav Lorenzen이 CO₂ 냉매를 이용한 초임계사이클에 대한 특허¹⁾를 출원하면서 폭넓은 기술개발이 다시 시작되게 되었다. CO₂ 냉매는 표 1에서 볼 수 있듯이 환경부하가 매우 작고

(ODP=0, GWP=1), 무독성, 불연성이며 가격이 저렴한 특성을 갖는다²⁾. 자연냉매인 HC계 냉매나 암모니아를 포함한 다른 냉매들은 상기에 기술한 모든 특성을 만족시키지 못하는데 문제가 있다. 열역학적으로는 CO₂ 냉매의 임계온도(31.1℃)가 매우 낮은 반면에 임계압력(7.4 MPa)은 대단히 높은 특징을 가지고 있다. 따라서, 고압단이 임계점 이상에서 작동하는 초임계사이클이 된다. 또한 고압냉매이므로 체적냉동능력이 매우 커서 시스템을 소형화할 수 있는 가능성이 있는 반면에, 고압대응 설계를 해야하는 어려움이 있다. 또한 압력비가 작아서 압축기의 등엔트로피효율이 다른 냉매에 비하여 비교적 우수하나, 압력차가 매우 커서 압축기의 초기 기동특성을 고려한 설계가 필요하다. 이산화탄소 냉매는 전달 물질성이 우수하고, 고압냉매이므로 열교환기에서의 압력강하가 시스템에 미치는 영향이 상대적으로 작을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

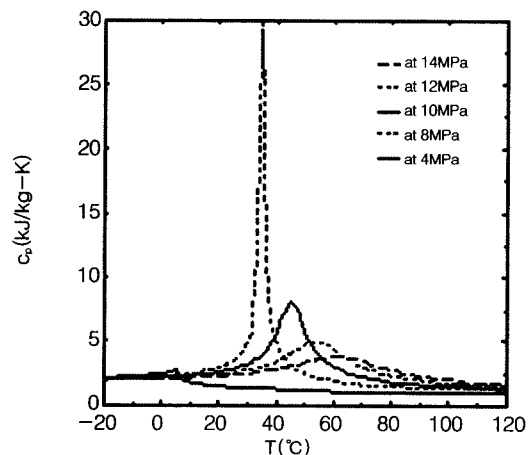
그림 1 ~ 5에는 물성치 프로그램³⁾을 이용하여 계산한 CO₂ 냉매의 열역학적 특성을 나타내었다. 앞에서 기술한 바와 같이 CO₂ 냉매의 작동압력은 매우 높으며, 다른 냉매에 비하여 체적냉동능력이 대단히 큼을 알 수 있다. CO₂ 냉매의 사이클은 고압단이 임계점 이상에서 작동하는 초임계사이클이



[그림 1] 온도-압력곡선



[그림 2] 체적냉동능력



[그림 3] 정압비열



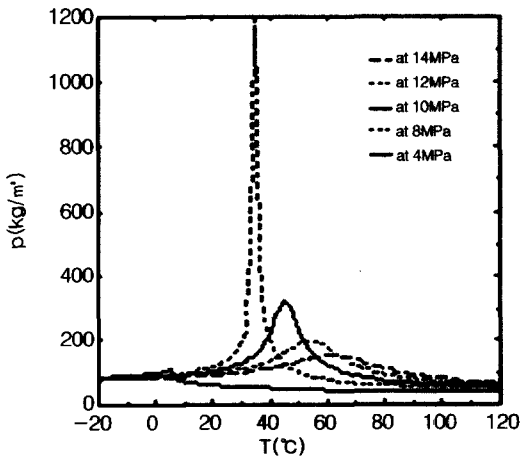
므로 기존의 아임제사이클과 달리 온도와 압력이 서로 독립변수가 되어 자유도가 하나 증가한다. 따라서, 시스템의 능력과 효율을 최적화하기 위해서는 고압단의 온도와 압력이 중요한 제어변수가 된다. 또한, 임계점 부근에서 동일압력하의 정압비열과 Prandtl수가 온도에 따라서 매우 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있으며, 동일 온도하에서는 압력에 따라서 열역학적 특성이 서로 크게 차이를 관찰할 수 있다. 이러한 열역학적 특성은 사이클의 성능 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

그리고, 이산화탄소의 포화액과 포화증기의 밀도비는 다른 냉매에 비하여 상대적으로 매우 작다. 예를 들면, 0℃에서의 포화액과 포화증기의 밀도비는 R-744 : 9.5, R-410a : 38.4, R-407c : 65.0, R-134a : 89.2 로 압력이 높은 냉매일수록 밀도비가 낮은 것을 관찰할 수 있는데, 이는 2상유동에서의 열유동 양식에 영향을 미칠 수 있다.

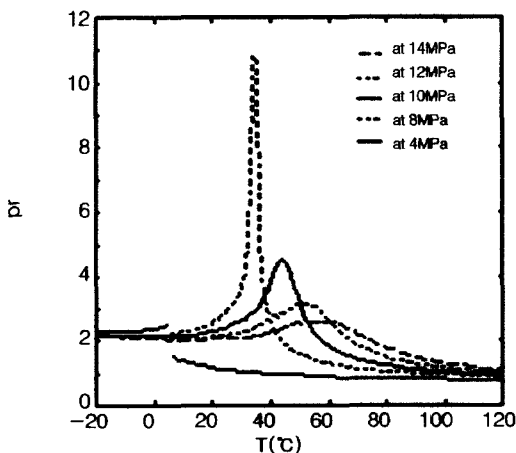
급탕시스템

일본 내의 급탕기 수요는 표 2에 나타낸 바와 같이 연간 360만대 정도이며, 급탕에 소요되는 에너지는 가정에서 사용하는 에너지의 약 28%를 차지하고 있다. 이는 일본에서 소비되는 전체에너지의 약 4%에 해당된다. 따라서, 일본 내에서의 급탕기의 에너지소비효율은 대단히 중요한 이슈가 되고 있다. 일본에서는 2001년 말부터 동경전력을 중심으로 여러 사가 동일한 상품명 "Eco-Cute" 로 급탕기를 출시하고 있으며⁴⁾, 가스온수기에 비하여 75%까지 운전비용을 절감할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

표 3에 일본 각사에서 출시한 급탕기를 비교하여 나타내었다. 표 3에는 나타나지 않았으나, 마쯔시다는 다이킨과 히다찌는 덴소와 함께 CO₂ 급탕시스템을 개발하여 출시하고 있다. 표 3에 보인 것과 같이 대부분의 업체가 가정용 소형 급탕시스템을 개발 판매하고 있으며, 동경전력은 28 kW급의 업무용 급탕시스템을 개발하여 출시하였다. CO₂ 급탕기는 그림 6에 나타낸 바와 같이, CO₂ 열펌프유닛과 온수 저장조의 두 개의 별도 유닛으로 구성된다. 열펌프 유닛은 압축기, 증발기, 가스냉각기, 팽



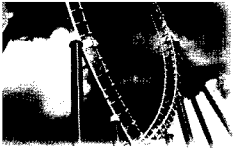
[그림 4] 밀도



[그림 5] Prandtl수

<표 2> 일본의 급탕기 시장 동향

분류	1999년	2000년	2001년
전기온수기	188,994	205,578	221,763
석유급탕기	518,049	508,491	495,556
가스 도시가스	1,601,518	1,595,443	1,575,307
온수기 LPG	1,267,735	1,298,460	1,345,566
합계	3,576,296	3,607,972	3,638,192



창장치등의 기본적인 증기압축사이클의 부품으로 구성된다(그림 7 참조). 가스냉각기와 증발기의 두 가지 열교환기가 열펌프유닛에 함께 배치되어 고정되므로, 기존의 열펌프의 실외기에 비하여, 물대냉매의 가스냉각기가 하나 더 들어 있는 형태가 된다. 각사가 사용하는 가스냉각기의 구조에 따라서, 가스냉각기를 열펌프 유닛내에 설치하는 장소도 상이하다. 다이킨의 경우는 열펌프 유닛의 하부에 가스냉각기가 수평으로 설치되어 있으며, 산요전

기공조와 기타 업체의 경우는 압축기옆 부분에 가스냉각기가 수직방향으로 설치되어 있다.

압축기

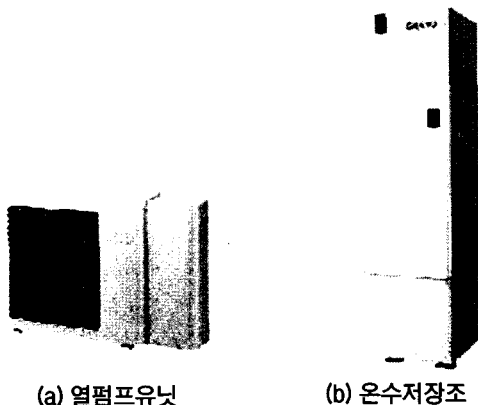
압축기는 CO₂ 급탕기의 성능에 크게 영향을 미치는 핵심부품의 하나로 표 4에 압축기의 형식별 장단점을 기술하였다⁵⁾. CO₂ 압축기는 앞에서 기술한 바와 같이 상당히 고압이고 압력비는 작은 반면 압력차는 대단히 큰 특성을 가지고 있다. 따라서, 이러한 특성을 잘 고려하여 압축기를 설계하는 것이 필요하며, 적용

제품의 특성에 잘 부합하는 압축기의 선정은 시스템의 성능과 신뢰성 측면에서 대단히 중요하다. 일본 내에서 개발되어 급탕기에 적용되고 있는 압축기는 스크롤 및 로터리 압축기로 대별되며 용량 대는 주로 1마력 급이다. 로터리압축기는 다이킨에서 개발한 스윙 1단 압축기와 산요전기공조에서 개발하여 사용하고 있는 2단 압축기로 구분된다(표 3 참조).

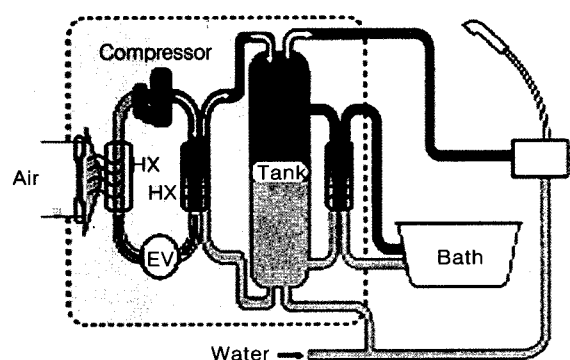
<표 3> CO₂ 급탕기의 비교 (전 자동식)

구분	산요전기공조		다이킨	일본전기(산요전기)
	로터리(2단 압축)	로터리(스윙)		
크기(H×W×D,cm)	62×93×27.6	62×93×29	73.5×82.5×30	67×81×32
중량(kg)	50	52	75	62
정격능력(kW)	4.5	4.5	4.5	4.5
계절성능(COP)	3.0	3.3	3.7	3.0
최고공급온도(℃)	90	90	90	90
압축기형식	로터리(2단 압축)		로터리(스윙)	스크롤
증발기형식	핀-원관식	핀-원관식	핀-원관식	핀-원관식
가스냉각기	물측: 원관 냉매측: 다채널 알루미늄관		물측: 원관 냉매측: 소구경원관	물측: 원관 냉매측: 소구경원관
소음(dBA)	45	45	45	45
탱크용량(L)	240	370	370	370
크기(H×W×D,cm)	190×54×63	180×70×84	178.8×66.7×70	163.5×109×45
중량(kg)	88 (328)*	106 (476)	69 (439)	95 (395)
소비전력(kW)	1.5	1.19	1.21	2.4 (히터포함)
급탕압력(kPa)	90	170	170	170
소비자가(천엔)	620	650	650	700

*는 저장탱크에 물이 가득 들어 있을 때의 중량을 나타냄.



[그림 6] CO₂ 급탕기



[그림 7] 급탕기의 구성도



열교환기

급탕시스템의 열교환기는 공기대 냉매용 열교환기인 증발기와 물대 냉매용 열교환기인 가스냉각기로 구성된다. 증발기는 기존에 널리 사용되고 있는 핀-원관 열교환기를 각사가 채용하고 있으며, 내압성을 위하여 관 두께를 보강하여 사용하고 있다. 가스냉각기는 물대 냉매를 열교환시키는 장치로, 각사가 서로 다른 형식의 열교환기를 사용하고 있다. 산요 전기공조는 물측은 구리로 만든 원관을 냉매측은 다채널 (관에 1.0×1.2 mm의 채널이 4개 있음) 알루미늄 압출관을 사용하고 있는데, 원관과 사각형관을 직경이 15 cm 정도 되는 원통에 나선형으로 감아서 사용하고 있다. 그러나, 물관과 냉매관사이는 그냥 접촉되어 있는 상태로 일정량의 접촉열저항이 존재한다. 다이킨의 경우도 물측의 구리 원관의 외벽에 소구경의 냉매측 원관을 나선형으로 감은 형태의 열교환기를 적용하고 있다. 덴소의 경우는 0.5 mm의 소구경 원관을 150개 정도를 조합한 평편관을 만들고, 그 외부에 핀이 달린 4 ~ 10 mm 크기의 물의 통로관을 구성하여 사용하고 있는데, 그 제조법이 간단하지 않을 것으로 보인다.

사이클 특성

CO₂ 냉매의 사이클은 열역학적 특성상 초임계사이클로 고압부(가스냉각기)의 온도구배를 잘 활용하면

〈표 4〉 압축기의 종류와 장단점

압축기 형식	장점	단점
왕복동	저압식 · 내압설계 용이 · 고온토출이 가능	토크변동이 큼 · 구조 복잡/부품수가 많음
스크롤	저압식 · 내압설계 용이 · 고온토출이 가능 · 토크변동이 작음	펌프용적 작아 누설명향 큼 · 고/저압 sealing 필요 · 고압력차로 추력하중 증대
로터리 (1단 압축)	고압식 · 기구부가 간단함	토크변동 크고 압축하중 증대 · 내압설계 및 고온토출에 불리 · 윤활/기구부의 압력차가 큼
로터리 (2단 압축)	중압식 · 토크/하중 변동이 작음 · 내압설계 비교적 용이 · 고온토출이 가능	고/중간압 내부 sealing 필요

사이클의 특성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 접근온도 (approaching temperature), 즉, 가스냉각기의 출구온도와 물의 입구온도의 차를 줄이면 시스템의 효율 및 작동압력을 감소시킬 수 있다. 이를 위해서는 가스냉각기의 성능을 향상시켜야 하는데, 가스냉각기를 대항류 열교환기로 설계하는 것이 요구된다. 그러나, 가스냉각기의 출구의 냉매온도가 임계온도에 가까우면, 최적의 성능을 내기 위한 고압단의 압력 제어가 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 또한 급탕기의 경우는 가스냉각기로 공급되는 물의 온도가 비교적 낮아서 (표 5 참조) 시스템의 성능에 미치는 영향이 그다지 크지 않을 것으로 보인다. 그러나, 난방기로 사용하는 시스템에서 2차유체로 물을 사용하는 경우는 가스냉각기로 돌아오는 물의 온도가 부하에 따라서 다르겠지만, 급탕기에 비하여 상대적으로 높아질 것으로 예측된다. 이 경우에는 가스냉각기의 냉매출구온도가 높게 되므로 시스템의 능력은 물론 효율도 많이 저하될 것으로 생각된다. 따라서, 2차유체로 물을 사용하는 CO₂ 난방시스템의 설계시에는 상기사항을 고려하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 노력이 필요할 것으로 보인다.

성능 규격 및 시험조건

CO₂ 급탕시스템의 성능에 대한 규격(JRA4050)이 일본냉동공조공업회에서 제정되어 사용되고 있는데, 이는 CO₂ 급탕기의 제조사와 일본냉동공조공업회가 규격위원회와 기술부회를 구성하여 2001년 9월에 공동으로 제정한 것이다⁷⁾. JRA4050에는 CO₂ 급탕시스템에서 사용되는 각종 용어가 정의되어 있으며, 표 5에 나타난 성능시험시의 온도조건도 기술되어 있다.

〈표 5〉 시험 조건

	냉원수 온도 (°C)		열원 공기온도 (°C)	
	입수온도	출수온도	건구온도	습구온도
정격가열조건	17±2.0	65±2.0	16±1.0	12±0.5
동결가열조건	9±2.0	동결가열온도±20	7±1.0	6±0.5
제상조건	5±2.0	-	2±1.0	1±0.5
과부하조건	29±2.0	-	43±1.0	26±0.5



그리고, 기타 소음시험 규격을 비롯한 각종 신뢰성시험에 관한 규격도 JIS규격을 인용하여 규정하고 있다. 또한, 제품에 표시할 항목들도 자세히 규정하고 있으며, 부속서에는 동경과 오사카의 계절별 온습도조건과 함께 급탕기의 성능시험방법이 소개되어 있다.

환경보호법 및 정부지원제도

일본 내에서는 지구의 환경을 보호하기 위한 법안 및 지원제도가 정부주도로 많이 추진·제정되고 있는데, 다음과 같은 법안 및 정부지원금 제도가 CO₂ 급탕시스템의 개발 및 보급을 촉진시킬 것으로 예상된다.

- 지구온난화대책추진법(1999년)
- 가전제품 Recycle법 (2001년)
- Fron 회수과괴법 (2002년4월) : HFC냉매 포함
- 성에너지 제품의 정부 보조금 (2002년 6월)

CO₂ 급탕기는 현재와 같이 한정된 수량을 생산할 경우, 기존급탕기에 비하여 재료비가 매우 높은 것으로 보고되고 있다. 따라서, 원가 경쟁력을 준비할 수 있도록 정부에서 약 3년간 고효율에너지 제품에 대한 정부보조금 (약 53억엔)을 지원하여 제품의 개발 및 보급을 촉진하고 있다.

맺음말

지금까지 일본에서의 CO₂ 급탕기의 개발 배경, 기술 및 시장 현황을 간단히 살펴보았다. 일본과는 달리 우리나라는 일반가정의 경우 바닥 난방 및 온수를 공급하는 보일러가 설치되어 있어서 가정용 급탕기의 수요가 일본에 비하여 그다지 크지 않다. 반면에 소형 상업용 건물에 필요한 냉난방 및 급탕의 통합 시스템의 수요는 점차 증가할 것으로 보인다. 따라서, 이러한 시스템을 가격은 싸게 성능은 우수하게 개발한다면 제품의 경쟁력이 충분히 있을 것으로 보인다. 이를 위해서는 시스템에 대한 운전조건에 따라서 다르겠지

만, 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 체계적인 사이클의 성능향상 연구가 요구된다. 또한, 냉난방 시스템을 개발하기 위해서는 내압성과 착상/제상에 동시에 대응할 수 있는 실외측 열교환기의 구조개발이 필요하다. 이산화탄소냉매를 적용한 환경친화적 에너지절약 제품의 개발 및 보급을 촉진하기 위해서는 일본에서 시행되고 있는바와 같이 정부 차원의 강력한 지원 제도가 뒷받침되어야 하겠다. 그리고, CO₂ 냉매의 사용에 따른 시험 및 안전 규격 등 필요한 사항도 함께 검토가 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. G. Lorentzen, "Method of operating a vapor compression cycle under trans- or supercritical conditions," European Patent, EP0424474B2, 1989.
2. R. Rieberer, "CO₂ as working fluid for heat pumps," Ph.D. thesis, Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Austria, 1998.
3. Klein, S.A. and Alvarado, F.L., Engineering equation solver, version 5.212, F-Chart Software, 2000.
4. JARN, "Japanese makers rush to develop CO₂ heat pump water heaters," JARN, Vol.33, No.12, pp.26, 2001.
5. K. Sato, K. Matsumoto, H. Yamasaki, "The development of carbon dioxide hermetic compressor for heat pump water heater systems" Refrigeration, Vol.77, No.893, pp.193~197, 2002.
6. J. Yin, C. Bullard, P. Hrnjak, "Design strategies for R744 Gas coolers" Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, pp.315~322, 2000.
7. JRAIA, JRA Standard 4050: Heat pump water heaters using carbon dioxide refrigerant, JRAIA, 2001.