

# 이산화탄소 냉·난방 시스템의 특징 및 효율 향상 방안

김 용 찬 · 고려대학교 기계공학과, 교수  
조 흥 현 · NIST, Post Doc.

\_e-mail : yongchan@korea.ac.kr  
\_e-mail : h2cho@korea.ac.kr

이 글에서는 이산화탄소를 이용한 냉·난방 시스템의 특징을 소개하고, 효율을 향상시키기 위한 여러 가지 기술에 대하여 소개하고자 한다.

오존층 파괴와 지구온난화에 대한 문제가 전 세계적인 관심의 대상이 되고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 환경친화적인 고효율 냉난방 시스템의 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 기존에 널리 사용 하였던 CFC나 HCFC계의 냉매 들은 오존층 파괴문제로 규제되었 으며, 그 대안으로 개발된 HFC계 냉매 또한 2005년 교토 의정서가 발효되기 시작하면서 더 이상 궁극적인 대안이 되지 못함에 따라 자연냉매에 대한 연구는 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 이산화탄소를 비롯하여 암모니아, 탄화수소계열, 물, 공기 등 많은 자연냉매를 이용한 사이클에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서 이산화

탄소를 이용한 시스템은 유럽, 일본 및 미국을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔고, 급탕기, 자동차용 냉난방기, 자동판매기용 냉동시스템, 의류건조기 등 여러 제품들이 이미 출시되어 있다. 하지만 이산화탄소를 이용한 냉방 시스템은 아직 기존의 아임계 사이클에 비하여 성능이 낮고 외기나 충전량 변화에 성능이 크게 변화하여 신뢰성 확보와 성능향상을 위한 여러 가지 방안의 개발이 필수적이다. 따라서 이 글에서는 이산화탄소를 이용한 냉난방 시스템의 특징과 성능향상을 위한 여러 가지 방안에 대한 연구를 요약하여 설명하고자 한다.

## 이산화탄소 냉난방 시스템의 특징

이산화탄소의 경우 임계온도가 31.1°C, 임계압력이 7.2MPa로 외기와의 열교환을 통해 이루어지는 일반적인 냉난방 사이클을 형성하기 위해서는 임계압력 이상에서 운전되는 초월임계(supercritical) 사이클을 이룬다. 이산화탄소 초월임계 사이클은 상대적으로 높은 작동압력을 가지기 때문에 기존의 냉동시스템에 비하여 작은 압력비를 가지며 이에 압력손실이 시스템의 성능에 미치는 영향은 다른 시스템에 비해 작다. 또한 기존의 증기압축 사이클과 다르게 열교환 과정의 온도가 일정하게 고정되어 있지 않고 초월임계 상태에서 열교환 과정이 진행되기 때문에 시스템의 고압측의 압력이 COP와 시스템의 용량에 영향을 미칠 수

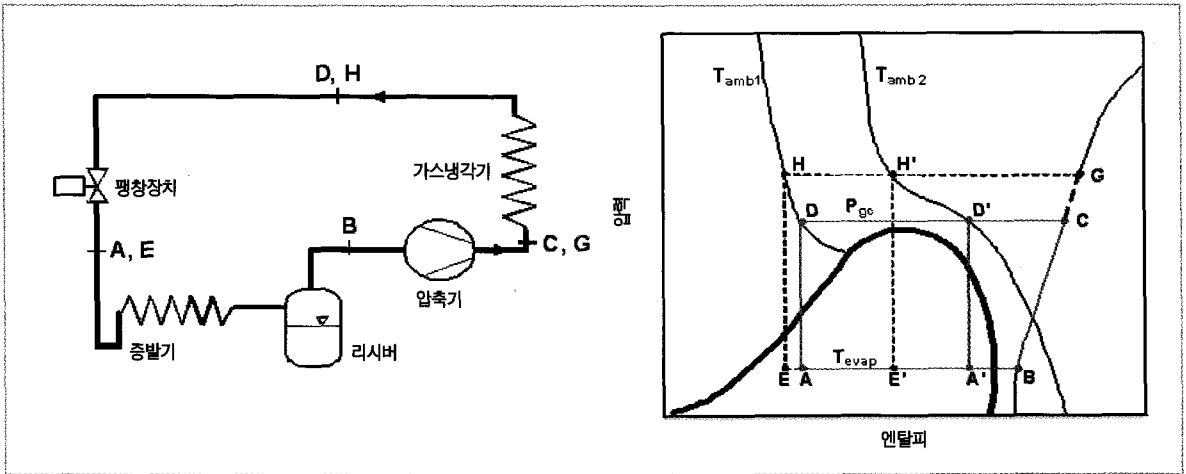


그림 1 이산화탄소 사이클과 외기온도에 따른 p-h 선도 변화

있는 중요한 변수가 된다.

그림 1에 일반적인 이산화탄소 사이클 구성도와 외기온도에 따른 사이클 변화를 압력-엔탈피 선도에 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 일정한 증발온도에서 가스냉각기(gas cooler)의 출구온도( $T_{amb1}$ )가 낮은 경우 시스템의 고압측 압력을 C→G로 증가시키면 사이클은 A-B-C-D에서 E-B-G-H로 변화하게 된다. 이 경우 압축일(specific compression work)의 증가량에 비하여 증발기 입구의 엔탈피 감소에 의한 냉방용량(specific refrigeration capacity)의 증가정도는 E-A가 되어 시스템의 성능은 감소하게 된다. 반면 가스냉각기 출구( $T_{amb2}$ )가 높은 경우 압축기 토출압력을 C→G로 증가시키면 사이클은 A'-B-C-D'에서 E'-B-G-H'로 변화하게 되며 이 경우 압축일의 증가량보다 증

발기에서 냉방용량(E'-A')의 증가량이 커지게 되어 시스템 성능은 향상된다. 또한 가스냉각 과정이 일정 압력하에서 냉매가 냉각되면서 온도가 연속적으로 변화하며, 온도구배도 압력에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 시스템의 용량은 고압단의 압력이 증가할수록 커지나 주어진 압력하에서 COP가 최대가 되는 가스냉각기의 압력이 개별적으로 존재하는 것을 알 수 있다. 그리고 가스냉각기의 출구온도가 감소할수록 시스템의 냉방성능이 증가하며 가스냉각기의 출구온도가 낮아질수록 시스템의 고압단의 압력이 성능에 미치는 영향이 더욱 민감함을 확인할 수 있다. 이와 같이 이산화탄소 사이클은 가스냉각 출구온도에 따라 성능이 크게 변화하고 가스냉각 출구온도는 외기조건과 가스냉각 압력에 의하여 결정된다.

일정한 압축비를 가진 이산화탄소 사이클에서 가스냉각 압력은 기본적으로 사이클의 냉매충전량에 의하여 결정되기 때문에 냉매충전량이 사이클의 성능에 미치는 영향은 매우 크다. 기존의 연구에 의하면 충전량이 최적충전량에 비해 20% 작은 경우 이산화탄소 시스템의 성능은 20% 이상 저하되며 충전량 변화에 따른 성능의 변화가 다른 냉매(R22, R410A, R407C)를 적용한 시스템보다 더욱 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 이와 같이 이산화탄소 사이클은 각각의 운전조건에 대하여 최적의 가스냉각기 온도와 압력이 개별적으로 존재하므로 이에 대한 정확한 운전조건 제어를 요하게 된다.

이산화탄소 초임계 사이클의 가스냉각 과정 중의 큰 온도구배를 이용하여 기존의 증기압축식 사이클에 비해 높은 효율을 가지

는 온수급탕용 열펌프 시스템을 구성할 수 있다. 이러한 특성은 온수급탕 시 기존의 증기압축식 열교환기의 온도변화가 없는 응축과정에 비해 초임계 사이클의 가스냉각기 열교환기의 온도변화 현상이 고온수를 얻는 데 유리하고 시스템 변화에 잘 적응하는 장점을 가지고 있기 때문이다. 실제로 이산화탄소를 이용한 시스템을 이용하여 온수 가열용 열펌프를 구성할 경우 같은 수준의 과냉도를 가지는 R-134a를 이용한 증기압축식 열펌프 사이클에 비하여 10~20% 정도 높은 COP를 나타내는 것으로 알려져 있으며 상대적으로 낮은 온도의 물을 높은 온도의 급수로 만들 경우 이산화탄소를 이용한 시스템이 우수한 성능을 가진다. 또한 이산화탄소를 이용한 시스템을 이용하였을 경우 전기 또는 가스 연소 시스템에 비해 에너지 소비를 75% 이상 줄일 수 있다고 보고되고 있다. 이산화탄소 급탕기는 높은 압축기의 토출온도를 이용하여 90°C 이상의 온수를 기존의 열펌프 시스템을 이용한 온수 가열기에 비하여 손쉽게 얻을 수 있다. 따라서 이미 많은 이산화탄소용 급탕기가 개발되어 시장에서 판매되고 있다.

반면, 이산화탄소 사이클은 높은 작동압력과 작은 표면장력에 의하여 다른 아임계 사이클에 비하여 팽창과정에서 큰 팽창손실을 가지며 시스템 용량이 증가할

수록 가스냉각기에서 열 제거 시 열교환 손실이 증가한다. 또한 열펌프의 경우 냉방과 난방운전 시 성능의 차가 크고 각각의 운전 사이클이 다르게 형성되므로 일정한 충전량에서 일정 이상의 냉난방 능력의 유지와 효율의 최적화가 어려운 특징을 가지고 있다. 기존의 연구에 의하면 냉방운전의 경우 가스냉각기 압력이 약 9.0~9.5MPa, 그리고 난방에서는 9.8~10.5MPa 근처에서 최적의 성능을 보이는 것으로 나타났다. 일반적으로 난방운전의 경우 낮은 외기조건에서 많은 난방용량의 확보를 위하여 고압의 운전압력과 많은 냉매유량이 필요하며 최적의 압축기 토출압력은 냉방운전에 비하여 높게 형성된다. 냉방과 난방 운전조건의 차이에 의하여 압축기 입구와 팽창장치에서 흡입되는 냉매의 유량 차이가 있으며 이에 압축기나 사이클의 최적화 또한 힘들다. 특히 냉방과 난방 압축기 입구의 흡입 냉매의 밀도가 크게 다르기 때문에 난방 사이클을 기준으로 최적인 압축기 용적비와 팽창장치를 설계한 시스템의 경우 냉방조건에서는 고압이 크게 증가할 수 있으므로 사이클의 최적화가 불가능하고 시스템의 신뢰성이 크게 저하된다. 일반적으로 냉방운전이 난방에 비하여 낮은 성능을 가지므로 최적충전량 선정 시 냉방성능을 우선적으로 고려하여 설정해야 하며 냉방보다 난방 시

많은 냉매유량을 요하므로 냉난방 시 충전량 차이에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 상분리기와 같은 장치를 이용하여 냉매량 차이에 대한 성능저하를 최소화해야 한다.

이와 같이 이산화탄소를 이용한 열펌프 사이클의 경우 열역학적 물성치와 운전특성에 의해 성능향상의 가능성이 크게 존재한다. 하지만 시스템 성능이 외기운전 조건에 민감하기 때문에 사이클의 특성을 이해하고 이를 최적화시킬 수 있는 여러 방법들의 개발을 통하여 신뢰성 확보를 위한 연구가 선행적으로 이루어져야 함을 확인할 수 있다. 이에 많은 연구자들이 여러 가지 성능향상을 위한 방법들을 제시하고 이에 대한 구체적인 연구를 진행하였으며 이를 소개하면 다음과 같다.

## 이산화탄소 냉난방 시스템의 효율 향상 방안

### 1) 내부열교환기(internal heat exchanger) 이용 사이클

앞에서 설명한 바와 같이 초월임계 이산화탄소 사이클의 성능은 외기온도에 매우 민감하게 반응한다. 특히 외기온도가 높은 경우 시스템에서 요구하는 능력을 확보하기 위해서는 압축기 토출압력을 크게 높여야 하며 이에 압축기 소요동력이 증가하여 시스템의 성능이 급격히 감소하게

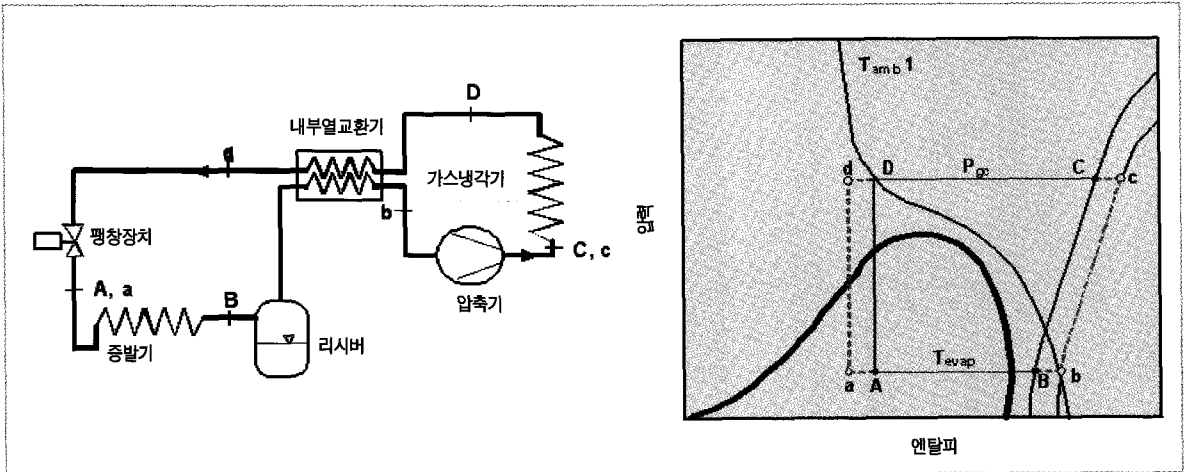


그림 2 내부열교환기를 적용한 사이클의 개략도와 p-h 선도

된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 쉬운 방법이 바로 내부 열교환기의 적용이다. 그림 2는 내부열교환기를 적용한 사이클의 개략도와 사이클 변화를 온도-엔트로피 선도에도 나타내고 있다. 내부열교환기는 증발기 출구의 차가운 냉매와 가스냉각기 출구의 냉매를 서로 열교환 함으로써 팽창장치 입구에서 냉매의 과냉도를 증가시켜 팽창장치의 비가역적인 손실을 줄이고 압축기 입구의 과열도를 확보하여 압축기에 유입되는 액상의 냉매를 방지하는 역할을 한다. 즉, 내부열교환기의 적용으로 팽창장치 입구의 냉매온도를 저하시킬 수 있으며 단위 냉매유량당의 가용엔탈피를 증가시켜 냉방용량을 증가시킬 수 있다. 또한 내부열교환기의 장착으로 최적의 토출압력을 내부열교환기를 장착하지 않은 경우에 비하여 1MPa 이상 낮출

수 있으며 넓은 영역의 외기온도 변화나 토출압력 변화에 대하여 성능저하가 작아지므로 시스템의 신뢰성이 크게 향상된다. 그러나 약조건 운전 시 내부열교환기의 장착으로 압축기 입구의 온도가 급격히 상승할 수 있으며 이 경우 압축기 체적효율이 감소하고 이에 토출되는 냉매유량의 감소로 이어져 성능이 급격히 감소하게 되므로 압축기 입구에서 일정 이하의 온도를 유지할 수 있도록 내부열교환기를 설계해야 한다. 기존에 연구에 의하면 단단압축 시스템에서 내부열교환기의 적용으로 냉방성능은 최대 9% 향상되는 것으로 보고되었으며, 이단 압축 시스템에서의 적용으로 성능은 18% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

난방운전의 경우 내부열교환기의 적용으로 높은 토출압력과 온도를 유지할 수 있어 난방용량은

약간 증가하나 이와 동시에 압축기 소요동력도 커진다. 따라서 난방운전의 경우 최적의 COP는 내부열교환기의 유무에 관계없이 비슷한 수준은 보이게 된다. 그러나 내부열교환기의 장착 유무에 따른 최적의 COP에서 난방용량을 비교해보면 내부열교환기를 설치하였을 경우가 더 큰 용량을 보이므로 큰 용량 확보에는 유리하다 할 수 있으나 내부열교환기의 적용으로 경제성에서는 불리한 단점을 가지고 있다.

## 2) 다단압축(multi-stage compression) 적용 사이클

이산화탄소 사이클의 경우 압축기에서 압축비( $P_{out}/P_{in}$ )는 2.5~3.5 정도를 나타내지만 평균 유효압력차가 5~7MPa로 다른 증기압축 시스템에 비하여 10 배 이상 높다. 따라서 단일의 압축기로 시스템이 운전되는 경우

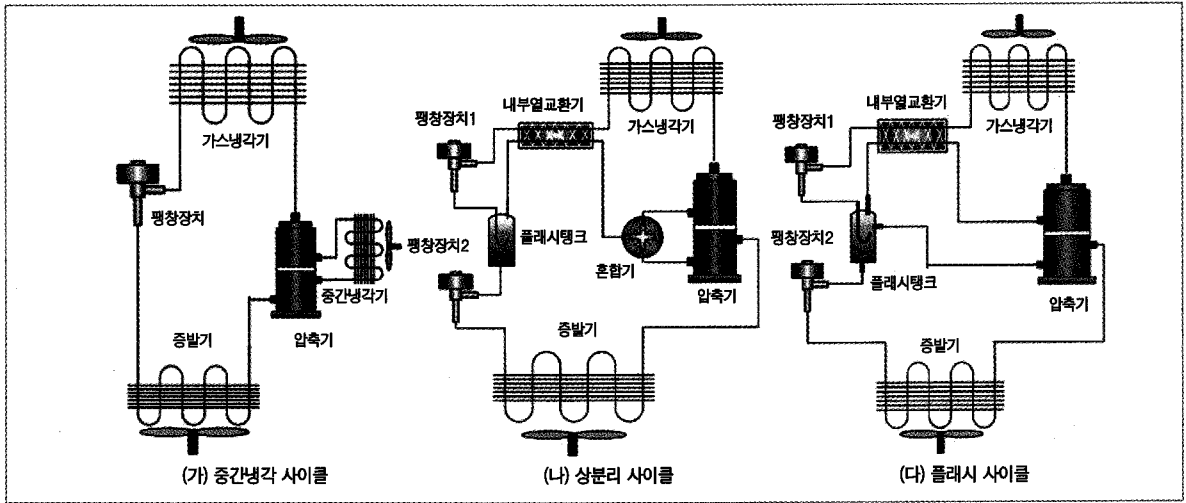


그림 3 여러가지 2단압축을 이용한 시스템

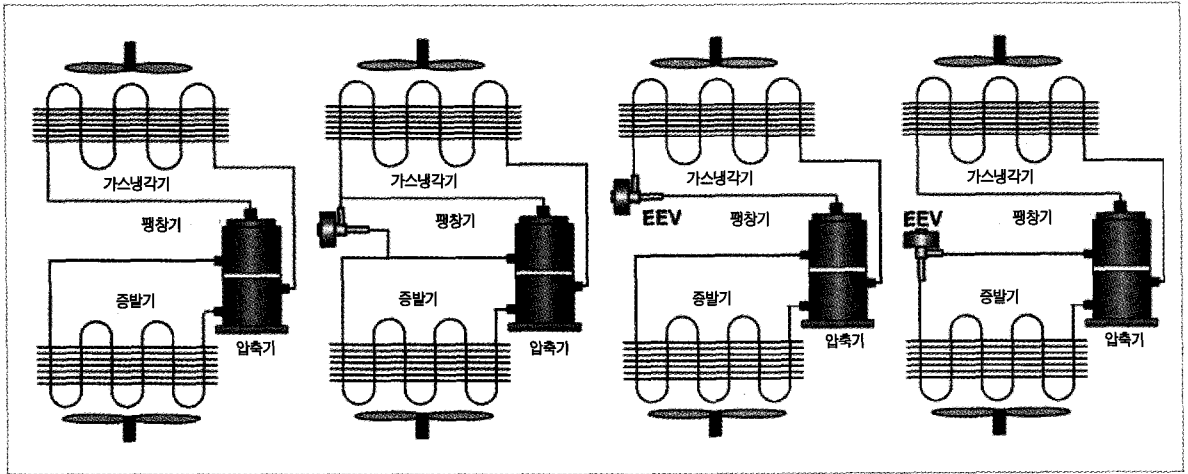
압축기 효율의 최적화가 어렵고 소요동력이 증가하여 시스템 신뢰성이 낮아진다. 특히, 냉방운전 시 외기의 온도가 높거나 많은 냉방용량을 요하는 경우, 그리고 난방운전 시 외기온도가 낮은 경우에는 용량확보를 위하여 가스 냉각기의 압력을 높게 유지해야 하므로 소요동력이 증가하게 되고, 시스템 성능이 크게 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 고안된 방법 중의 하나가 바로 다단압축을 이용한 시스템이다. 다단압축 사이클의 경우 각 단의 압축비가 작아지고 각 단에서 압축과정을 최적화함으로써 압축에 필요한 소요동력을 줄 단압일 수 있으며 압축과정에서 누설을 감소시켜 많은 냉매를 고압으로 토출시킬 수 있다. 특히 2단압축 시스템의 경우 중간냉각(inter-cooling)이나 인젝션(injection)

을 이용한 상분리(phase separate), 플래시(flash) 사이클 등 성능향상을 위한 여러 사이클의 구성이 가능하다. 인젝션을 이용한 2단압축(two-stage compression) 시스템의 경우 압축 중간이나 각단 사이에 차가운 냉매의 인젝션을 통하여 2단의 압축기 입구의 냉매온도를 낮출 수 있으며 이를 통하여 압축기 체적효율이 향상되고 냉매 토출량 또한 증가시킬 수 있다. 따라서 압축일의 감소와 증발기에서 냉방용량의 향상으로 시스템 성능이 크게 향상된다. 난방운전의 경우 저온조건 운전 시 난방용량 확보를 위하여 순환냉매량을 증가시켜 시스템의 냉매 부족현상 방지와 고주파수 운전에 따른 압축기 토출온도의 상승 방지효과로 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 그림 3은 여러가지 2단압축

시스템의 개략도를 보여주고 있다.

### 3) 팽창기(expander) 적용 사이클

이산화탄소 사이클의 경우 팽창과정 중 큰 압력차에 의하여 팽창과정의 비가역성이 증가하여 팽창손실(expansion loss)이 증가되고 팽창손실이 시스템 전체 손실 중 차지하는 비중이 다른 아임계 사이클에 비하여 매우 크다. 따라서 팽창 전후의 큰 압력차를 이용하여 운전되는 팽창기를 적용하는 경우 시스템 성능향상을 기대할 수 있다. 팽창기는 압축기의 반대과정으로 이루어지는 일종의 팽창장치로 고압의 냉매를 이용하여 단열팽창(isothermal expansion)시킴과 동시에 팽창력을 이용하여 일정 이상의 일을 얻을 수 있다. 즉, 팽창기를 적용함으로써 팽창손실을



여러가지 팽창기 적용 사이클

줄일 수 있으며 시스템에 구동에 이용될 수 있는 일을 얻어 이를 압축과정 전후에 사용함으로써 시스템의 소요동력을 크게 줄일 수 있다. 특히, 냉방용량의 확보가 용이해지므로 냉방성능의 향상 정도가 난방성능의 향상 정도보다 크게 나타난다.

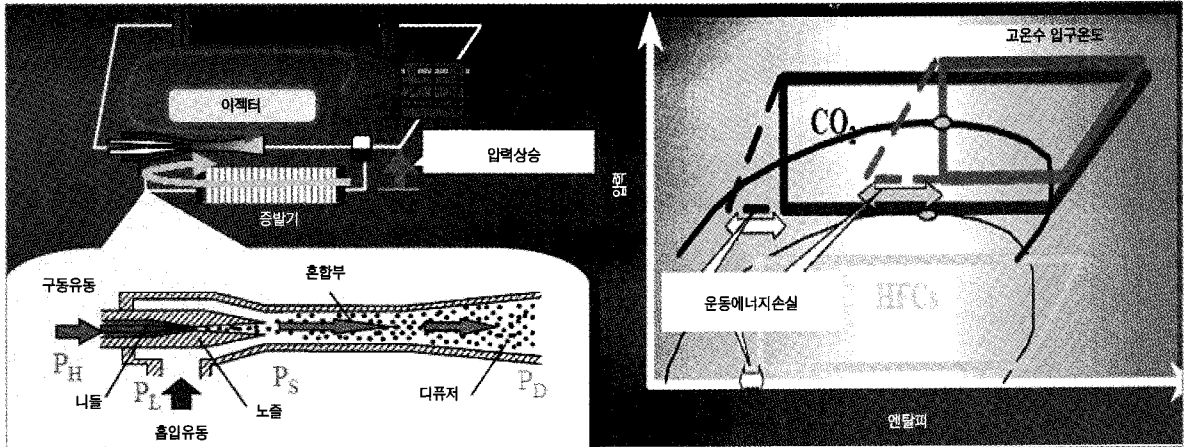
여러가지 팽창기 적용 사이클의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 팽창기를 이용하는 사이클에서 시스템 용량이 커지고 여러대의 실내기를 장착한 경우, 팽창기 이후에 냉매 편류현상이 크게 나타나므로 일부 실내기의 경우 냉매 부족으로 냉방이나 난방능력을 거의 가지지 못하는 현상이 발생한다. 따라서 이를 해결하기 위하여 팽창기와 팽창장치를 별도로 구성하고 상분리기를 이용하여 냉매를 분리하여 개별적으로 실내기에 공급하는 방법에 관한 많은 연구들이 진행 중이다.

그러나 팽창기를 시스템에 효과적으로 적용하기 위해서는 압축과 팽창과정에서의 누설방지에 대한 영향을 최소화하여야 하고 팽창기의 효율 상승과 효과적인 냉매의 분배에 관한 문제도 동시에 해결해야만 한다.

#### 4) 이젝터(ejector) 적용 사이클

이산화탄소 사이클에서 팽창손실을 줄일 수 있는 방법 중의 하나가 바로 이젝터를 이용하는 것이다. 이산화탄소를 이용한 시스템이 적용되는 이상유동(two-phase) 이젝터의 경우 구동노즐로 가스냉각기에서 나온 액상의 냉매가 유입되고 흡입부에서는 증발기에서 나온 기상의 냉매가 유입되는 구조로 구성된다. 냉동 사이클에 노즐을 이용하여 고압의 유체를 분출시키므로 주위의 저압의 기체와 운동량을 교환하게 되고 이를 통하여 저압의 기

체를 보다 높은 압력으로 변환시켜 흐르게 할 수 있다. 이산화탄소 사이클에 이젝터를 이용하는 경우 이젝터는 일종의 팽창기 역할을 하게 되며 이젝터를 이용하여 이상유동의 팽창과정을 등엔트로피 과정으로 유도함으로써 팽창손실을 줄일 수 있으며 압축기 입구에서의 압력을 보상하여 압축부하를 줄일 수 있다. 또한 증발기 입구의 엔탈피감소를 통하여 냉방용량이 증가되고 이에 시스템의 성능은 향상된다. 이산화탄소 시스템에 이젝터를 사용하는 Denso system의 경우 냉방능력의 증대 및 압축기 동력감소로 20% 이상의 에너지 절약이 가능하다고 보고하였다. 그러나 아직까지 이젝터의 효율성에 대한 여러 이견이 존재하고 있으므로, 적용 타당성을 넓은 운전범위에서 검증할 필요성이 있다. 그림 5는 이젝터를 이용한 사이클의



Denso 사의 이젝터를 이용한 이산화탄소 사이클의 개략도와 p-h 선도

개략도와 압력-엔탈피 선도에서 사이클의 변화를 보여주고 있다.

### 맺음말

이 글에서는 이산화탄소를 냉매로 하는 냉난방 시스템의 성능 특성과 성능향상 방안에 대하여 서술하였다. 지금까지 연구에 의하면 이산화탄소 시스템은 냉매의 임계온도가 낮고 작동압력이 높기 때문에 기존의 냉매를 적용한 아임계 사이클보다 열역학적

으로 낮은 성능을 나타내며 외기 온도와 같은 외부조건 변화에 대한 성능변화가 심해 이에 대한 최적화가 어렵다. 특히 냉난방 시스템에서 냉방과 난방의 압축기 입구의 흡입냉매의 밀도가 크게 다르기 때문에 최적인 압축기 용적비와 팽창기 설계비로 시스템이 설계된 경우 냉방조건에서는 고압이 크게 향상되기 때문에 최적화가 불가능하고 시스템 성능이 크게 저하되는 특징을 보인다. 이러한 문제들을 극복하고 시스

템의 성능과 신뢰성 향상을 위하여 내부열교환기, 2단압축, 팽창기, 그리고 이젝터를 이용한 시스템이 연구되고 있으며, 이의 적용에 따른 운전특성과 성능향상에 대하여 알아보았다. 이러한 여러 노력을 바탕으로 이산화탄소 시스템의 성능이 향상되고 신뢰성이 확보된다면 머지않아 이산화탄소를 이용한 가정용 냉난방 시스템의 보급이 확대될 것이고 환경 규제에 대한 적극적인 해결책이 될 것이라 기대된다.