

고체-기체 화학흡착식 냉동, Malone 냉동, 맥동관 냉동

Solid-Gas Chemisorption Refrigeration, Malone Refrigeration and Pulse Tube Refrigeration

정 은 수

E. S. Jeong

홍익대학교 기계공학과



· 1959년생

· 맥동관냉동기, 열음향냉동기 등 프레온계 냉매를 사용하지 않는 냉동기술에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

지금까지 거의 모든 증기압축식 냉동기에 사용되고 있는 CFC 계 냉매가 지구의 오존층을 파괴한다는 사실이 밝혀지면서 CFC 계 냉매의 생산 및 사용에 대한 규제가 날로 강화되고 있다. 이러한 규제를 피하기 위하여 CFC 계 냉매를 대신하여 증기압축식 냉동기에 사용할 수 있는 대체냉매를 개발하려는 노력도 활발히 진행되고 있으며, 또 한편으로는 CFC 계 냉매를 사용하지 않고 냉동효과를 얻을 수 있는 새로운 방식의 냉동기를 개발하려는 노력도 진행되고 있다.

증기압축식 냉동사이클을 이용하지 않는 새로운 방식의 냉동기술이 사람들의 관심을 끌게 된 단기적인 원인은 물론 몬트리얼협약에 의하여 2000년부터 CFC 계 냉매의 생산을 금지하도록 한 것이지만, 보다 장기적인 요인은 적극적인 냉동을 필요로 하는 상온초전도체(high temperature superconductor)의 발견과 고속고집적 전자회로(high speed and high density electronic circuit)의 발달이다. 앞으로 고속 전자부품, 전자·광학기기, 장거리

광통신, 그리고 컴퓨터의 장기적인 발달은 이들의 생각을 위해 사용할 수 있는 적절한 냉동기의 유무와 냉동기의 신뢰성, 그리고 효율에 의하여 좌우될 전망이다.

증기압축식 냉동기를 대체하기 위하여 현재 연구되고 있거나 제안된 냉동방식으로는 기체 상태의 냉매를 액체 상태의 흡수제에 흡수/재생시키는 흡수식 냉동, 기체 상태의 냉매와 고체 상태의 흡착제를 이용하는 수소흡장식 냉동기나 화학흡착식 냉동기, 그리고 스텔링사이클이나 그 변형을 이용하는 스텔링냉동기, VM 냉동기, Malone 냉동기, 맥동관냉동기, 열음향냉동기 등이 있다. 본고에서는 국내에 비교적 잘 알려지지 않은 고체-기체 화학흡착식(solid-gas chemisorption) 냉동기, Malone 냉동기, 맥동관냉동기(pulse tube refrigerator) 등의 작동원리와 특징 등을 간단히 소개하고자 한다.

2. 고체-기체 화학흡착식 냉동

하절기의 냉방수요 급증에 따른 하절기와 동절기의 전력수급 불균형 문제를 해소하려는 하나의 방안으로 흡수식냉동기의 사용이

점차 증가하고 있다. 현재 상업적으로 사용되고 있는 흡수식냉동기는 증기 상태의 냉매(물 또는 암모니아)를 액체 상태의 흡수제(리튬브로마이드 수용액이나 물)에 흡수/재생시키는데, 초기투자비가 크고 유지비가 비싸며(특히 리튬브로마이드/물 시스템), 소형화가 어렵고, 용액펌프가 전력을 소비한다는 단점을 갖고 있다.

고체 흡착제와 기체 냉매를 사용하는 고체-기체 흡착식냉동기는 흡수식냉동기에 대한 대안으로 오랫동안 간주되어 왔으나, 지금까지는 주로 물, 암모니아, 또는 알코올을 냉매로, 금속의 수소화물(metal hydrides), 비석(zeolite), 활성화탄소(activated carbon) 등을 흡착제로 사용하는 시스템들에 대하여 연구가 진행되어 왔다. 이 시스템들에서, 일부 금속의 수소화물을 제외하고는, 용액의 증기압은 흡착제 내부의 냉매농도와 용액온도의 함수인데, 이러한 성질이 유효 온도상승(effective temperature lift)을 감소시키고, 요구되는 열원의 온도를 상승시키므로 시스템의 효율을 저하시키며, 또 다단시스템의 적용을 어렵게 만드는 요인이다. 이상적인 흡수/흡착시스템은 흡수제나 흡착제가 많은 양의 냉매(최소한 자기중량의 50% 이상)를 흡수/흡착해야 하며, 냉매의 증기압이 냉매의 농도에 따라 변하지 않아야 한다.

고체-기체 화학흡착식 냉동기/열펌프는 흡착제로 금속 무기염(metal inorganic salts)의 암모니아화물(ammoniates)이나 수화물(hydrates)을 사용한다. 금속 무기염의 암모니아화물이나 수화물은 많은 양의 냉매(암모니아나 물)를 가역적으로 흡착/탈착할 수 있고, 또한 흡착/탈착 반응이 한 온도-압력에서 일어나므로 이상적인 흡착시스템이 요구하는 성질들을 갖고 있다. 이러한 물질들에서 물이나 암모니아는 흡착제 분자와, 표면의 흡착이나 전자를 공유하는 반응에 의해서가 아니라, 전자의 전위에 의하여 결합을 하는데, 이 결합을 화학흡착(chemi-

sorption)이라 부르며 이렇게 결합된 화합물을 복합화합물(complex compound)이라고 부른다.

화학흡착반응에서는 하나의 흡착제 분자가 보통 4-8개의 냉매분자와 결합할 수 있으므로 많은 양의 냉매를 흡착할 수 있다. 그림 1은 복합화합물이 가역적으로 흡착/탈착할 수 있는 냉매의 양을 기존의 고체-기체 흡착제인 활성화 탄소와 비석, 그리고 흡수식냉동기에 사용되는 액체-기체 흡수시스템의 대표적인 냉매 흡수량과 비교하였다. 복합화합물이 기존의 고체-기체 흡착시스템이나 액체-기체 흡수시스템에 비하여 3-5배 정도 냉매를 더 많이 보유할 수 있다는 것을 그림 1에서 볼 수 있다.

흡수/흡착식 시스템에 있어서 흡수/흡착제의 최대 냉매보유량도 중요하지만, 흡수/흡착이 일어나는 속도도 시스템의 크기와 냉난방능력을 결정하는 중요한 인자이다. 액체-기체 흡수식시스템에서 발생기(generator)와 흡수기(absorber)의 크기는 열 및 물질전달계수에 반비례한다. 고체-기체 흡착식시스템의 경우에도 흡착제와 냉매 사이의 열 및 물질전달률이 요구되는 흡착제 표면적과 흡착제의 중량을 결정하므로 높은 열전달계수와 물질전달계수를 얻는 것이 중요하다. 화학 흡착식 시스템의 열 및 물질전달계수는 열교환기의 형상 최적화와 암모니아 화합물의 물성 조절을 통하여 향상되었는

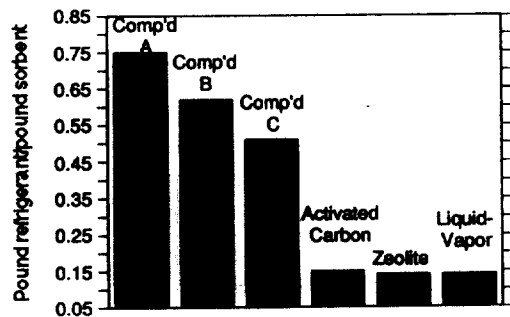
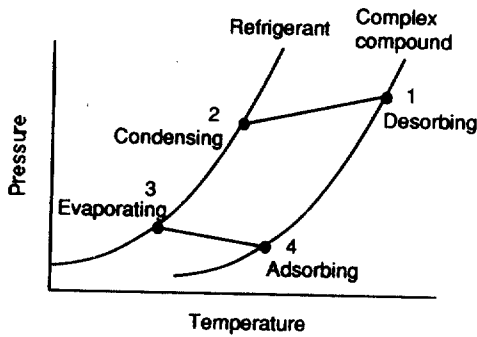
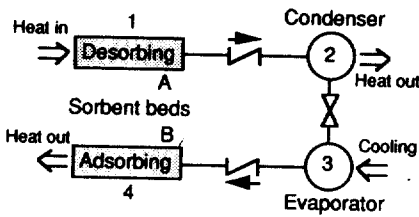


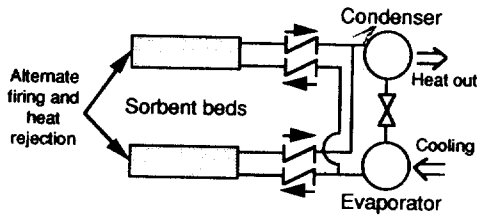
그림 1 여러가지 흡수/흡착 시스템의 냉매 보유량 비교



(a)



(b)



(c)

그림 2 고체-기체 흡착식 냉동기의 열역학적 사이클과 구성

데, 지금까지 개발된 복합화합물의 동력밀도(power density)는 기존의 흡착제의 동력밀도보다 5-10배 정도 크다.

그림 2는 고체-기체 흡착식 냉동기의 열역학적 사이클과 작동원리를 보여준다. 그림 2(b)의 흡착제 A는 상태 1에서 고온의 열원에 의하여 가열되며 냉매를 탈착시킨다. 이 흡착제는 체크밸브에 의하여 응축기와 연결되어 있는데, 흡착제 내부의 냉매의 증기압은 압력-온도선도에서 알 수 있는 바와 같

이 응축기의 압력보다 높으므로 냉매 증기는 응축기로 이동한다. 동시에 체크밸브에 의하여 증발기와 연결되어 있는 상태 4의 흡착제 B는 열방출온도로 유지되는데, 이 온도에서 흡착제 내부의 냉매 증기압은 증발기의 압력보다 낮으므로 냉매는 증발기에서 흡착제 B로 이동한다. 이 과정동안 흡착제 A는 흡열반응인 탈착이 일어나도록 고온의 열원에서 열을 받고, 발열반응인 흡착이 일어나는 흡착제 B와 냉매가 응축되는 응축기에서는 중간온도에서 외부로 열을 방출하며, 증발기에서는 냉매가 증발하며 냉동효과를 얻게 된다. 이 과정이 끝나면 2개의 흡착제의 온도는 바뀌는데, 냉매를 충분히 흡착한 흡착제는 냉매를 탈착하도록 고온의 열원에서 열을 받으며, 냉매를 충분히 탈착한 흡착제는 냉매를 흡착하도록 주위온도로 냉각된다. 냉매의 유동은 그림 3(c)와 같이 흡착제에 한 쌍의 체크밸브를 연결함으로써 조절된다. 증기압축식 냉동기와 비교하면 2개의 흡착제와 4개의 체크밸브들이 증기압축식 냉동기의 압축기의 역할을 하는 것을 알 수 있다.

고체-기체 화학흡착식 냉동기의 장점을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 열 및 물질전달이 매우 빠르므로 소형, 경량화가 가능하여 초기투자비가 적게 든다.(냉동온도 -57°C 인 산업용 냉동시스템의 경우 고체-기체 화학흡착식: \$400/ton, 암모니아 압축식: \$825/ton)
- (2) 냉매를 많이 보유할 수 있으므로 효율이 높고 운전비용이 저렴하다.(표 1 참조)
- (3) 용도에 맞추어 흡착제와 냉매의 선택이 가능하므로 최적화가 가능하다.
- (4) 밸브외에는 구동부가 없으며 유지비가 저렴하다.
- (5) 기계적에너지나 전기를 사용하지 않는 열원구동방식이다.

표 1 고체-기체 화학흡착식 시스템과 증기압축식 시스템의 운전비용 비교

| Application | Gas Cost (\$/MMBtu) | Electricity Cost (\$/kWh) | Cooling Temp. (F) | Heat Rejection Temp. (F) | Complex Comp'd System COP(Gas) | Electric System COP | Operation Cost Electric System (\$/Ton-H) | Operation Cost Complex Comp'd System (\$/Ton-H) | Complex Comp'd Savings (\$) |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------|---|---|-----------------------------|
| Residential Heat Pump (Cooling Mode) | 5.00 | 0.11 | 40 | 95 | 1.0 | 2.93 (SEER 10) | 0.132 | 0.093 | 0.099 (0.015) |
| | 2.50 | 0.05 | | | | | 0.060 | 0.075 | |
| | 2.50 | 0.11 | | | | | 0.132 | 0.063 | 0.069 |
| | 2.50 | 0.05 | | | | | 0.060 | 0.045 | 0.015 |
| Residential Heat Pump (Heating Mode) | 5.00 | 0.11 | 30 | 140 | 1.7 | 1.0 | 0.387 | 0.068 | 0.319 |
| | 5.00 | 0.05 | | | | | 0.176 | 0.050 | 0.126 |
| | 2.50 | 0.11 | | | | | 0.387 | 0.051 | 0.336 |
| | 2.50 | 0.05 | | | | | 0.176 | 0.033 | 0.143 |
| Refrigeration | 5.00 | 0.11 | -40 | 95 | 0.37 | 1.28 | 0.302 | 0.184 | 0.118 |
| | 5.00 | 0.05 | | | | | 0.137 | 0.172 | (0.035) |
| | 2.50 | 0.11 | | | | | 0.302 | 0.103 | 0.199 |
| | 2.50 | 0.05 | | | | | 0.137 | 0.091 | 0.046 |
| | 5.00 | 0.11 | -70 | 95 | 0.30 | 0.76 | 0.509 | 0.222 | 0.281 |
| | 5.00 | 0.05 | | | | | 0.231 | 0.210 | 0.021 |
| | 2.50 | 0.11 | | | | | 0.509 | 0.122 | 0.387 |
| | 2.50 | 0.05 | | | | | 0.231 | 0.110 | 0.121 |

고체-기체 흡착식냉동기는 현재 미국의 Gas Research Institute, DOE, NASA, Southern California Gas Company, Brooklyn Union Gas Company 등의 지원을 받아 가정용 열펌프, 가정용 냉장고, 대용량의 산업용 냉동기 등의 용도로 개발이 진행되고 있다. 지금까지 개발된 고체-기체 화학흡착식냉동기의 COP는 냉동온도가 -57℃인 1단(single stage) 냉동기의 경우 0.4이고, 주거용 3단 열펌프의 경우 냉방 COP = 1.2, 난방 COP = 2.1이다.

3. Malone 냉동

Malone 냉동은 스티어링사이클이나 Brayton 사이클을 응용하는 냉동기의 작동유체

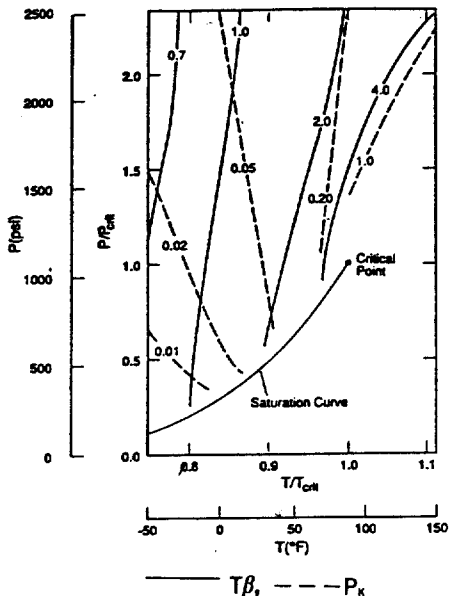


그림 3 액체 이산화탄소의 성질

로 임계점 부근의 액체를 사용하는 냉동방식으로, 상변화 없이 액체의 팽창에 의하여 냉동효과를 얻는다. Malone 냉동기는 1989년 Los Alamos National Laboratory의 Swift에 의하여 CFC계 냉매를 사용하는 증기압축식 냉동기를 대체할 수 있는 대안으로 제시되었는데, 다른 장점으로는 소형, 고효율, 안전성 등을 들 수 있다.

일반적으로 액체는 열역학적으로 불활성이라고 잘못 인식되고 있으나, 임계점 부근의 액체는 스텔링사이클이나 Brayton 사이클 등의 재생사이클을 이용하는 냉동기의 작동유체로 사용하기에 적합한 열역학적 성질들을 갖고 있다.

단상(single phase)의 냉매가 가져야 할 가장 중요한 성질은 열팽창계수 β 가 커야 한다는 것이다. 왜냐하면 등온팽창시의 열흡수량은 β 에 비례하기 때문이다. 이상기체의 $\beta T=1$ 이며, 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 임계점 부근에서 액체 이산화탄소의 $\beta T \sim 1$ 이다. 그림 3은 액체 이산화탄소의 성질만을 보여주지만 다른 액체들의 성질도 임계압력 P_{crit} 과 임계온도 T_{crit} 로 무차원하여 그리면 액체 이산화탄소와 비슷한 모양을 보인다. 따라서, 임계점 부근의 넓은 범위에 걸쳐서 액체의 열팽창계수는 단상냉매로 사용하기에 충분히 크다는 것을 알 수 있다.

단상의 냉매가 가져야 할 두번째 중요한 성질은 압축률 κ 가 작아야 한다는 것이다. 압축률이 작을수록 단열손실도 작아지고, 또한 미소한 체적의 변화에도 큰 압력의 변화를 얻을 수 있다. 이상기체의 경우 $\kappa P=1$ 인데 그림 3에서 임계점 부근의 액체 이산화탄소의 $\kappa P \leq 1$ 이므로, 액체의 압축률이 기체에 비하여 매우 작아서 단상냉매로 사용하기에 적합함을 알 수 있다. 액체의 압축률이 기체에 비하여 매우 작으므로 같은 압력 변화를 얻기 위하여 액체를 작동유체로 사용하는 냉동기의 실린더와 주변의 기계적 요소들이 기체를 작동유체로 사용하는 냉동기에 비하여 매우 작아질 수 있다. 또한, 압

축률이 낮다는 것은 단위체적당의 탄성에너지가 작다는 것을 의미하므로 액체를 냉매로 사용하는 냉동기는 기체를 사용하는 냉동기보다 폭발 위험성이 훨씬 작아진다.

액체를 단상냉매로 사용할 경우의 또 다른 장점은 정압체적비열(volumetric specific heat for constant pressure)이 크다는 것이다. 압력 1500psi, 상온에서 헬륨가스의 정압체적비열은 $1.3 \text{ Btu}/\text{ft}^3 \cdot \text{F}$ 이나, 액체 이산화탄소의 정압체적비열은 임계점 부근에서 $30 \text{ Btu}/\text{ft}^3 \cdot \text{F}$ 로 매우 크다. 정압체적비열 $30 \text{ Btu}/\text{ft}^3 \cdot \text{F}$ 를 갖는 액체가 1 F 의 온도변화를 겪을 때의 열전달량은 기존의 냉매인 R-12 증기의 잠열 $30 \text{ Btu}/\text{ft}^3$ 과 비슷하다. 따라서, 열전달량이 같을 경우 액체는 기체보다 열교환기를 통과하는 체적이 훨씬 작아도 되므로, 액체를 냉매로 사용하는 냉동기는 기체를 사용하는 냉동기에 비하여 열교환기로 액체를 통과시키는데 필요한 기계적 일이 작아지고, 또한 열교환기의 크기도 작게 할 수 있다.

단열팽창에 의한 온도변화율과 압력변화율의 비는 단원자 기체의 경우 0.4이나 액체의 경우는 0.01~0.06이므로, 압력변화가 같을 경우 액체의 온도변화는 기체의 온도변화에 비하여 매우 작다. 따라서, 냉동기의 온도차를 크게 하기 위하여 액체를 단상냉매로 사용하는 냉동기는 스텔링사이클이나 Brayton 사이클 등의 재생사이클을 사용하여야 한다.

위에 기술한 바와 같이 임계점 부근의 액체는 단상냉매로 사용하기에 매우 적합한 열역학적 성질들을 갖고 있다. 액체의 온도가 $0.7T_{crit} < T < T_{crit}$ 에서 단상냉매로 사용하기에 적합하므로 Malone 냉동기는 작동온도보다 약간 높은 임계온도를 갖는 액체를 작동유체로 사용하는 것이 적절하다. CO_2 ($T_{crit}=31^\circ\text{C}$, $P_{crit}=72\text{atm}$)는 독성이 없고 화염성이 없으며 환경문제도 없으나, 임계온도가 낮아서 시스템의 효율이 낮아지는 문제점이 있다. 이산화탄소에 메틸알코올,

에틸알코올, 아세톤, 이산화 유황을 섞은 희용액들은 임계온도가 각각 240℃, 243℃, 236℃, 158℃로 이산화탄소의 임계온도보다 높아서 효율을 높일 수 있으나, 약간의 안전성을 희생해야 한다. 프로판($T_{crit}=97℃$, $P_{crit}=41atm$)과 프로필렌($T_{crit}=92℃$, $P_{crit}=45atm$)은 임계압력이 낮아서 이산화탄소보다 낮은 압력에서 작동할 수 있으나, 화염성이 좋아서 안전성에 문제가 있다.

그림 4는 Los Alamos National Laboratory의 실험용 Malone 냉동기를 보여준다. 이 냉동기는 4개의 스텔링냉동기로 이루어져 있는데, 각각의 위상차는 90°이며, 99기압의 프로필렌을 냉매로 사용하였다. 이 냉동기에서 얻은 대표적인 성능은 온도차가 30℃, 압력변화가 81.6atm, 피스톤의 주파수가 4.5Hz일 때 냉동용량은 703W이고, 실제 얻은 성적계수와 Carnot 사이클과의 비는 $COP/COP_{Carnot}=0.2$ 였다. 그러나, 이 실험용 냉동기는 액체를 냉매로 사용하는 냉동기의 작동원리를 이해하고 문제점들을 알아보기 위하여 설계제작되었으며, 냉동기의 효율, 크기, 신뢰성 등에는 크게 신경을 쓰

지 않고 제작된 것이므로 불필요한 손실들을 저감시키면 성능향상은 $COP/COP_{Carnot}=0.5$ 까지 기대된다.

Malone냉동기의 장점인 소형화를 위해서는 열원(heat source)이나 열침체물(heat sink)로 물과 같은 액체를 사용하는 것이 바람직하다. 앞으로의 개발방향은 선형모터(linear motor)로 구동되는 자유행정(free piston) 스텔링냉동기인데, 이것은 환형(annular type) 재생기와 열교환기로 둘러싸인 형태가 될 것이다. 이러한 형상의 Malone 냉동기를 직경 30cm, 길이 60cm로 package화 하면 온도차가 30℃일 경우 4kW의 전력을 이용하여 냉동용량 5ton을 얻을 수 있으리라 예상된다.

4. 맥동관냉동

근래 전자부품이나 센서와 같이 발열량이 작고 작동온도가 4~150K인 전자부품이나 센서 등의 냉각을 위한 소형 극저온냉동기에 대한 관심이 증대하고 있다. 현재 소형 극저온냉동기로는 스텔링냉동기와 GM냉동기가 가장 많이 사용되고 있다. 이 냉동기들은 상온부와 저온부에 2개의 구동부를 갖고 있어서 구조가 복잡하며 장기간 보수없이 사용하기 곤란한 문제점을 갖고 있는데, 특히 저온에서 일어나는 변위기(displacer)의 실(seal)과 실린더 사이의 마찰이 이들 냉동기의 신뢰성을 저감시킨다. 맥동관냉동기는 상온에서 하나의 구동부를 갖고 있고 저온측 구동부는 없으므로 구조가 간단하고, 저온측의 진동이 없으며, 또한 평균 압력비도 낮아 장기간 보수가 필요 없는 고신뢰성의 극저온 냉동기로 사용되기에 적합한 장점들을 고루 갖추고 있어서 이의 실용화를 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

맥동관냉동기는 1963년 Gifford Longworth에 의하여 처음 고안되었다 이들이 만든 맥동관냉동기의 구조는 그림 5(a)에 보여졌는데 기본형 맥동관냉동기(basic pulse

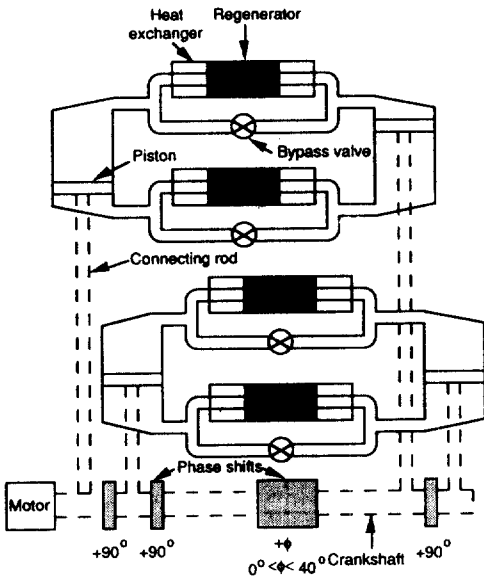


그림 4 실험용 Malone 냉동기의 구성

tube refrigerator)라 불린다. 그러나 기본형 맥동관냉동기는 효율이 낮고 냉동용량이 작아서 큰 관심을 끌지 못하였다 이러한 문제점은 1984년 Mikukin에 의하여 고안된 오리피스 맥동관냉동기(orifice pulse tube refrigerator)에 의하여 상당 부분 해결되었다. 오리피스 맥동관냉동기는 그림 5(b)와 같이 기본형 맥동관냉동기의 고온측 열교환기의 막힌 부분에 오리피스(orifice)를 달아 작동유체의 일부가 오리피스를 통해 저장소(reservoir)로 흘러 들어갔다 나왔다 할 수 있도록 한 것이다.

작동유체가 이상기체일 경우 맥동관의 한 단면을 흐르는 한 사이클동안의 평균 엔탈피유동은

$$\begin{aligned} \langle \dot{H} \rangle &= \frac{C_p}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{m} T dt \\ &= \frac{C_p A_g}{R\tau} \int_0^{\tau} \mu P dt \end{aligned} \quad (1)$$

로 표현되는데, 여기서 \dot{m} 은 질량유속, C_p 는

정압비열, T 는 온도를 나타내고, τ 는 사이클의 주기, A_g 는 단면적, μ 는 길이방향 속도, 그리고 R 은 기체상수이다.

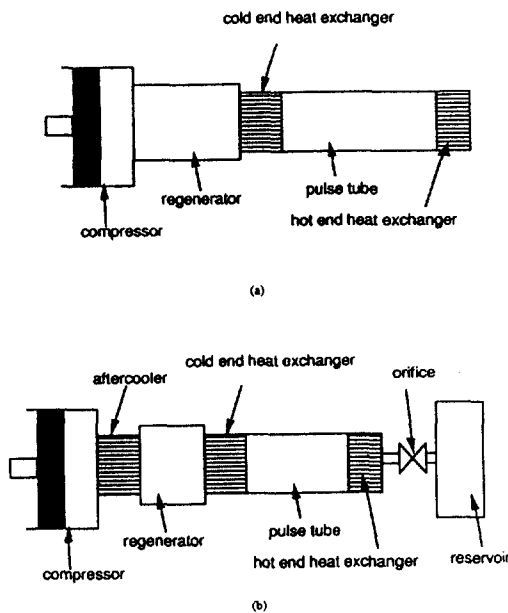
오리피스 맥동관냉동기에서 냉동효과를 발생시키는 압력과 속도 사이의 위상차는 기본형 맥동관냉동기에서와 같이 작동유체와 맥동관 벽과의 열전달에 의하여 생기는 것이 아니라 오리피스를 통해 저장소로 흘러 들어갔다 나오는 작동유체에 의하여 생기므로 기본형 맥동관냉동기에 비해 운전속도를 빠르게 할 수 있다. 오리피스 맥동관냉동기는 압축기의 속도를 빠르게 할 수 있으며, 또 오리피스와 저장소에 의해 맥동관을 흐르는 작동유체의 질량유량이 증가하면서 관을 통과하는 정미엔탈피의 양도 커지므로 냉동용량이 증가한다. 1단(single stage) 기본형 맥동관냉동기에서 얻을 수 있는 최저 냉동온도는 124K이었는데, 오리피스 맥동냉동기에서는 60K의 냉동온도를 얻었다.

오리피스 맥동관냉동기는 기본형 맥동관냉동기에 비하여 냉동온도와 냉동용량을 크게 향상시켰지만 스티어링냉동기나 GM냉동기에 비하여 작동유체 단위 질량유량당의 냉동용량은 여전히 작다. 따라서, 같은 냉동용량을 얻기 위해서는 오리피스 맥동관냉동기의 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량은 스티어링냉동기나 GM냉동기의 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량보다 많아야 한다. 재생기를 통과하는 질량이 증가할수록 재생기의 효율이 낮아져 재생기 손실이 커지고, 압축기의 기계적 손실도 커지므로 냉동기의 전체 효율은 낮아진다.

Zhu 등의 단순화된 해석에 의하면 저온측 열교환기와 맥동관의 경계를 통과하는 체적유량 \dot{V}_l 은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\dot{V}_l = \frac{T_{fh}}{T_{f0}} \dot{V}_0 + \left(\frac{T_{fh}}{T_{f0}} V_w + \frac{V_p}{\gamma} \right) \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

여기서 \dot{V}_0 는 오리피스를 통과하는 체적유량, T_{fh} 는 맥동관과 고온측 열교환기 사이의 경계면을 통과하는 작동유체의 온도, T_{f0} 는



(a) 기본형 (b) 오리피스형

그림 5 기본형과 오리피스 맥동관냉동기의 구조

오리피스를 통과하는 작동유체의 온도, V_w 와 V_p 는 각기 고온측 열교환기와 맥동관의 체적, γ 는 비열비, 그리고 P 는 맥동관의 압력을 나타낸다. 저온측 열교환기와 맥동관의 경계를 통과하는 단위 시간당의 정미 엔탈피유동(net enthalpy flow)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \dot{H}_l \rangle &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \dot{m} C_p T_{f,l} dt \\ &= \frac{C_p}{R\tau} \int_0^\tau P \dot{V}_0 dt \end{aligned} \quad (3)$$

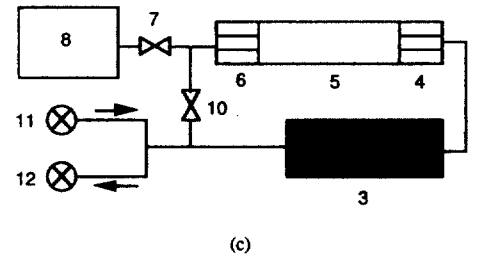
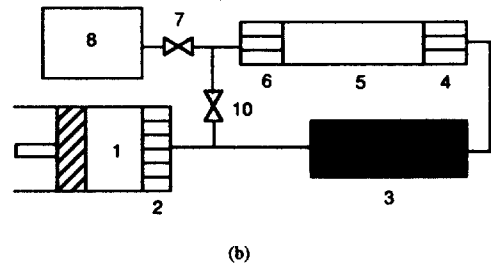
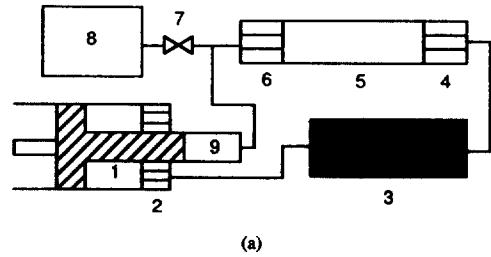
식 (3)에 식(2)를 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \dot{H}_l \rangle &= \frac{C_p}{R\tau} \int_0^\tau P \dot{V}_0 \frac{T_{f,h}}{T_{f,0}} dt \\ &\quad + \frac{C_p}{R\tau} \int_0^\tau \left(\frac{T_{f,h}}{T_{f,0}} V_w + \frac{V_p}{\gamma} \right) \frac{dP}{dt} dt \end{aligned} \quad (4)$$

저장소의 압력은 거의 일정하므로 오리피스를 통과하는 체적유량 \dot{V}_0 는 맥동관의 압력 P 와 같이 변화하여 \dot{V}_0 과 P 사이의 위상차가 거의 없으므로 식(4)의 우변의 첫번째 항은 항상 0보다 크다. 그러나, 식(4)의 우변의 두번째 항의 괄호 안의 값은 거의 일정하고 dP/dt 는 주기함수이므로 이 항은 0에 가깝게 된다. 즉 재생기를 통과하는 체적유량은 식 (2)와 같이 두 개의 항으로 표현되는데 첫번째 항만이 냉동효과를 얻는데 기여하고 두번째 항은 냉동효과에 기여하지 못한다. 오리피스 맥동관냉동기에서는 식 (2)의 두번째 항으로 표현되는 체적유량이 냉동에 기여를 하지 못하나 재생기를 통과하여야 하므로 단위 질량유량당의 냉동용량이 스틸링냉동기나 GM냉동기에 비하여 낮고 최저 냉동온도를 높게 한다.

이중입구 맥동관냉동기(double inlet pulse tube refrigerator)는 위에서 설명한 오리피스 맥동관냉동기의 단점을 해결하기 위하여 압축기를 나오는 작동유체가 모두 재생기를 통과하여 맥동관으로 이동하지 않고 그림 6과 같이 일부를 고온측 열교환기를 통하여 직접 맥동관으로 가게 한 것이다. 즉, 식

(2)의 냉동에 기여하지 못하는 체적유량이 재생기를 통과하지 않고 고온측 열교환기를 통하여 맥동관으로 이동하도록 한 것이다. 그림 6의 (a)는 피스톤은 하나이나 실린더가 2개인 압축기를 이용하는 단피스톤형



(a) Stage piston type, (b) Gas distributor type, (c) Gas distributor type with valves

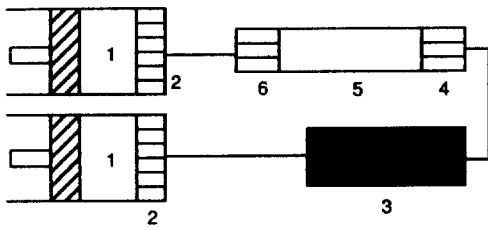
1 : compressor, 2 : aftercooler, 3 : regenerator, 4 : low temperature heat exchanger, 5 : pulse tube, 6 : high temperature heat exchanger, 7 : orifice, 8 : reservoir, 9 : auxiliary compressor, 10 : distributor valve, 11 : high pressure valve, 12 : low pressure valve

그림 6 이중입구 맥동관냉동기의 종류

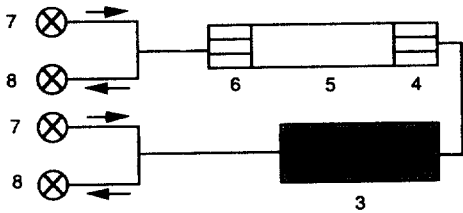
(stage piston type)이며, (b)는 압축기와 고온측 열교환기 사이에 밸브를 설치하여 재생기로 향하는 유량과 고온측 열교환기로 향하는 유량을 조절하는 가스분산형(gas distributor type)이고, (c)는 (b)와 같은 방법으로 유량을 조절하나 압축기 대신에 고압측 밸브와 저압측 밸브를 교대로 개폐하여 맥동관냉동기내의 작동유체를 압축 팽창시키는 방식이다. 단피스톤형 이중입구 맥동관냉동기는 기존의 시판되고 있는 압축기를 사용할 수 없어 특수 제작해야 하고, 또한 재생기로 향하는 질량유량과 고온측 열교환기로 향하는 질량유량이 주압축기와 보조압축기의 단면적비에 의하여 결정되

로 실용화에 어려운 문제점이 있다. 가스분산형 이중입구 맥동관냉동기는 기존의 압축기를 사용할 수 있으며, 재생기로 향하는 질량유량과 고온측 열교환기로 향하는 질량유량을 밸브를 사용하여 조절할 수 있기 때문에 냉동온도의 변화에 따른 최적조건에서 작동할 수 있는 장점을 갖고 있어서 실용화의 가능성이 단피스톤형보다 크다. 1단 이중입구 맥동관냉동기에서 실험적으로 얻은 최저 냉동온도는 42K이다.

그림 7은 two-piston type 맥동관냉동기와 four-valve type 맥동관냉동기를 보여주는데, 이것들도 이중입구 맥동관냉동기와 같이 재생기를 통과하는 질량유량을 감소시키면서 맥동관내의 작동유체를 압축 팽창시켜 작동유체 단위질량당의 냉동용량을 높이고자 하는 형태이다. Four-valve type 맥동관냉동기에서는 최저 냉동온도를 30K 이하까지 얻었으며 냉동온도 55K에서의 냉동용량은 10Watt였다.



(a)



(b)

(a) : Two-piston type pulse tube refrigerator, (b) : Four-valve type pulse tube refrigerator, 1 : compressor, 2 : aftercooler, 3 : regenerator, 4 : low temperature heat exchanger, 5 : pulse tube, 6 : high temperature heat exchanger, 7 : high pressure valve, 8 : low pressure valve

그림 7 기타 맥동관냉동기

5. 맺음 말

지금까지 증기압축식 냉동기를 대신할 대안으로 제시된 새로운 방식의 냉동기들 중 고체-기체 화학흡착식 냉동기, Malone 냉동기, 맥동관냉동기의 작동원리와 장점 등을 소개하였다. 이러한 냉동기들에 대한 연구는 현재 선진국에서 실험실적으로 시작품을 제작하여 성능과 신뢰성 향상을 위한 연구가 진행되고 있는 단계이며, 실용화를 위해서는 해결되어야 할 여러가지 문제점들이 남아있다. 그러나, 이 냉동기들은 모두 CFC계 냉매를 사용하지 않으며, 전기구동이 아닌 열원구동(고체-기체 화학흡착식), 소형(Malone), 고신뢰성(맥동관냉동기) 등의 장점들을 갖고 있어서 앞으로의 응용 가능성은 매우 크다고 전망되므로, 국내에서도 관심을 갖고 연구를 시작해야 할 분야라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Garret, S. L. and Hofler, T. J., 1992, "Thermoacoustic refrigeration," ASHRAE Journal, December, pp. 28~36.
2. Rockenfeller, U., Kirol, L. D., and Ryan, W. A., 1992, "Solid-gas chemisorption : Efficient HVAC&R without CFCs," ASHRAE Journal, March, pp. 54~58.
3. Swift, G. W., 1990, "Malone refrigeration," ASHRAE Journal, November, pp.28~34
4. Swift, G. W., 1989, "A Stirling engine with a liquid working substance," Journal of Applied Physics, Vol.65, p. 4157
5. Radebaugh, R., "A review of pulse tube refrigerator," Advances in Cryogenic Engineering, Vol.35, pp.1191~1205.
6. Mikulin, E. L., et. al., "Low-temperature expansion pulse tubes," Advances in Cryogenic Engineering, Vol.29, p. 629.
7. Matsubara, Y. and Miyake, A., 1988, "Alternative method of the orifice pulse tube refrigerator," Proc. Fifth Intl. Cryocooler Conf., pp.127~135.
8. Radebaugh, R., Zimmerman, J., and Smith, D. R., 1986, "A comparsion of three types of pulse tube refrigerators: New methods for reaching 60K," Advances in Cryogenic Engineering, Vol.31, pp.779~789.
9. Wu, P., Zhu, S., and Chen, Z., 1990, "Analysis of double inlet pulse tube refrigerator with a valveless stepped piston compressor," Proceedings of 13th ICEC, Cryogenics, Vol. 30, September supplement, pp.253-256.
10. Zhu, S., Wu, P., and Chen, Z., 1966, "Double inlet pulse tube refrigerators :