

맥동관 냉동기

남 관 우
현대중공업 기계전기연구소

1. 서 론

극저온 냉동기중에서 맥동관 냉동기는 다른 형태의 냉동기보다 단순한 구조를 갖고 있고 신뢰성이 높으므로 차세대 냉동기로 각광을 받고 있으며 세계적으로 가장 활발하게 연구되고 있다. 맥동관이란 속이 빈 관 내부에서 가스의 왕복유동에 의한 압력 변화가 있다는 것을 의미한다. 사실 관 내부에서의 압력 변화는 GM 냉동기 또는 Stirling 냉동기에서도 나타나는 현상이지만 이들 냉동기에는 관 내부에 변위기가 왕복 운동을 하는 것이 맥동관 냉동기와 구별되는 가장 큰 차이점이다. 변위기와 관 사이에는 기밀성을 유지하기 위한 씰(seal)이 있는데, 장시간 운전 시 마모 또는 균열이 발생하여 주기적으로 교체해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 획기적으로 해결할 수 있는 것이 맥동관 냉동기이다.

맥동관 냉동기는 1960년대 초에 등장한 후 많은 개량을 거듭하여 현재는 다른 종류의 극저온 냉동기를 머지않아 대체할 수 있을 것으로 인식되고 있다. 이 글에서는 맥동관 냉동기의 역사를 되돌아보고 작동 원리 및 현재의 기술 수준에 대하여 기술하고자 한다.

2. 맥동관 냉동기의 시초

맥동관 냉동기에 관한 논문은 1960년대 초반에 미국 Syracuse 대학의 Gifford와 Longsworth에 의해 공동으로 발표되었다 [1-2]. 초기의 맥동관 냉동기는 그림 1과 같이 회전 밸브, 재생기, 맥동관 그리고 그림에 표시하지 않은 압축기로 구성되어 있고 맥동

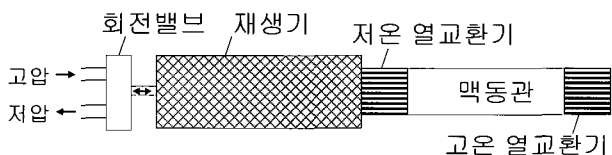


그림 1. 초기의 맥동관 냉동기(기본형)

관은 한쪽이 막힌 구조로 현재의 맥동관 냉동기보다 단순하다. 압축기는 작동 가스를 압축하여 고압을 생성하고 회전 밸브는 압축기의 고압 포트와 저압 포트에 연결되고 재생기 및 맥동관에 주기적으로 압력 변동(맥동) 및 이로 인한 가스의 왕복유동이 발생하도록 한다. 재생기는 맥동관으로 유입되는 가스의 온도를 낮게 유지시켜주는 역할을 한다. 맥동관 냉동기 개발의 아이디어는 한쪽이 막힌 관 내부에서 가스의 주기적인 압축/팽창이 일어나면 관 표면에 급격한 온도 구배가 발생한다는 사실에서 비롯되었다[2-3]. 급격한 온도 구배를 발생시킬 수 있다면 열교환기와 재생기를 연결하여 냉각 효과를 볼 수 있을 것이다.

온도 구배는 한마디로 왕복하는 가스와 관 벽사이의 주기적인 열교환에 의한 효과이다. 그림 2와 같이 사각파 모양의 압력이 맥동관에 가해질 때, 미소 가스 덩어리의 온도 변화를 살펴보자. 압력 상승에 의해 관 왼쪽에서 가스가 유입되면 초기 임의의 위치에 있는 가스 덩어리는 관의 닫힌 부분을 향해 이동한다(1-2). 관 내부에 가스가 유입되어 압력이 상승하면 그에 따라 가스의 온도가 올라가게 되고 가스에서 옆 관 벽으로 열이 전달되게 된다(2-3). 회전 밸브에 의해 맥동관이 압축

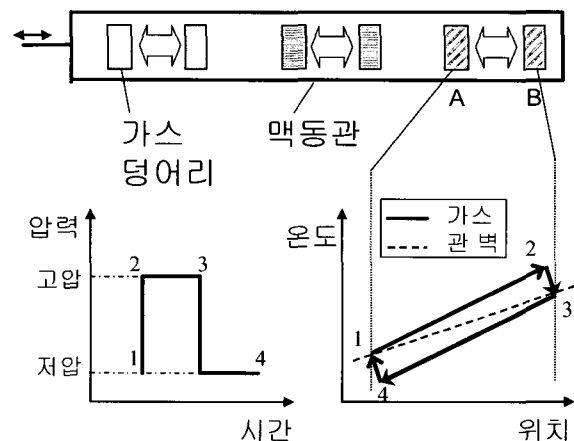


그림 2. 압력 변동에 따른 맥동관 내부에서 임의의 가스 덩어리의 온도 변화

기의 저압 포트와 연결되면 맥동관에서 가스가 빠져나가게 되는데 이에 따라 압력이 낮아지고 가스 덩어리는 왼쪽 입구 쪽으로 이동한다(3→4). 이 때 팽창에 의해 온도가 떨어지고, (2→3) 과정에서 가스가 주위 관 벽에 열을 빼앗겼기 때문에 초기 위치의 관 벽 온도보다 낮게 된다. 따라서 관 벽은 가스에 의해 열을 빼앗기게 되고 한 사이클을 마친다(4→1). 이와 같은 과정을 거쳐서 A 지점에서 B 지점으로 열이 전달되는데 이것을 표면 열펌핑 효과(Surface heating pumping effect)라고 한다[3].

위의 설명에서는 맥동관 내부의 임의의 가스 덩어리만 고려했지만 실제로는 모든 가스가 이러한 표면 열펌핑 과정을 거친다. 결과적으로 왼쪽 끝부분은 가스의 유입 온도로 유지되고, 오른쪽으로 갈수록 온도가 높아져서 닫힌 끝부분에서 온도가 가장 높게 된다. 표면 열펌핑에서 중요한 변수 중에 하나는 압력을 얼마나 빠르게 변동시켜 주느냐 하는 것이다. 압력 변동이 너무 빠르면 가스에서 관 벽으로 열이 제대로 전달되지 않을 것이고, 너무 느리면 맥동관의 반경 방향뿐만 아니라 축 방향으로 열이 전달되어 온도 구배가 유지되지 않을 것이다. 좀더 엄밀하게 얘기하면 반경방향으로의 열확산(Thermal Relaxation) 시간이 맥동 압력의 반주기와 같을 때 표면 열펌핑 효과는 극대화된다.

재생기가 없이 맥동관에 압력을 주기적으로 가하면 냉동 효과는 거의 발생하지 않는다. 왜냐하면 맥동관 입구로 유입되는 가스의 온도는 항상 상온이기 때문이다. 유입되는 가스 온도를 떨어뜨리는 방법은 없을까? 맥동관에서 토출되는 가스 온도는 유입되는 가스 온도보다 낮기 때문에 이 두 가스 사이에 열교환을 적절하게 시켜주면 될 것이다. 열교환의 매개체는 재생기인데 맥동관과 회전 밸브 사이에 연결한다. 재생기에는 관 내부에 단위 체적당 표면적이 큰 다공성 매질이 채워져 있고 작동 가스가 다공성 매질 사이를 주기적으로 흐른다. 표면 열펌핑에 의해 온도가 낮아진 가스는 맥동관에서 토출되어 재생기를 통과하게 된다. 이 때 다공성 매질은 맥동관에서 토출되는 가스에 의해 냉각이 된다. 다음 사이클에서 압축기로부터 유입되는 가스는 냉각된 다공성 매질에 의해 온도가 낮아지게 되고 결과적으로 맥동관으로 이전 사이클보다

차가운 가스가 들어오게 된다. 맥동관의 닫힌 부분은 열을 배출하기 위하여 냉각수가 흐르는 고온 열교환기가 부착되어 있고 재생기와 맥동관 사이에는 냉동 부하를 걸어주기 위한 저온 열교환기가 연결되어 있다. 이와 같은 형태의 맥동관 냉동기를 후에 개발된 다른 맥동관 냉동기와 구별하여 기본형(basic) 맥동관 냉동기라고 이름을 붙였다[6].

1962년부터 Syracuse 대학에서 개발된 기본형 맥동관 냉동기는 개량을 거듭하여 1단 냉동기로 124K의 최저도달온도를 기록하였고, 2단으로 79K를 달성하였던 것은 당시 매우 흥미로운 결과였다[4]. 기본형 맥동관 냉동기는 단순한 구조가 갖는 매력으로 인하여 초기에 극저온 냉동기의 새로운 대안으로서 많은 관심을 받았다. 그러나 당시 1단 냉동기로서 가장 널리 사용될 수 있는 80K 냉동온도를 갖는 기본형 맥동관 냉동기가 개발되지 못하여 1970년대 이후로 연구가 거의 중단되게 된다.

3. 맥동관 냉동기의 도약

기본형 맥동관 냉동기가 개발된 지 20여년이 지난 후 맥동관 냉동기의 성능은 비약적으로 발전하게 된다. 1984년 Mikulin 등은 그림 3(a)와 같이 맥동관 내부의 고온 열교환기에 오리피스를 부착하고 고온 열 교환기 뒤에 부피가 큰 가스 저장소(reservoir)를 연결하여 오리피스

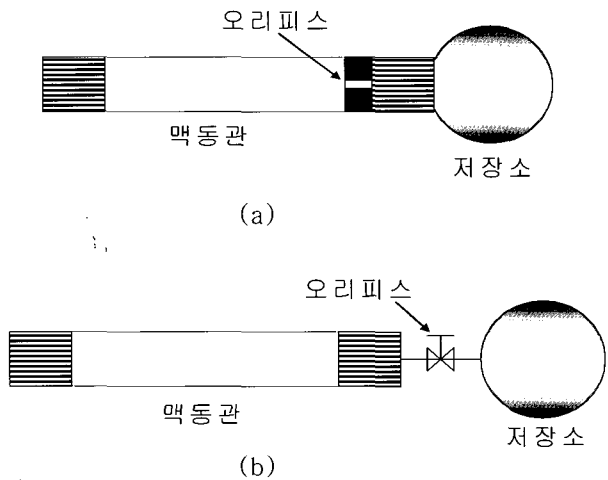


그림 3. 오리피스 맥동관 냉동기 (재생기 및 압축기는 생략) (a) 초기 모델 (b) 개량형 모델

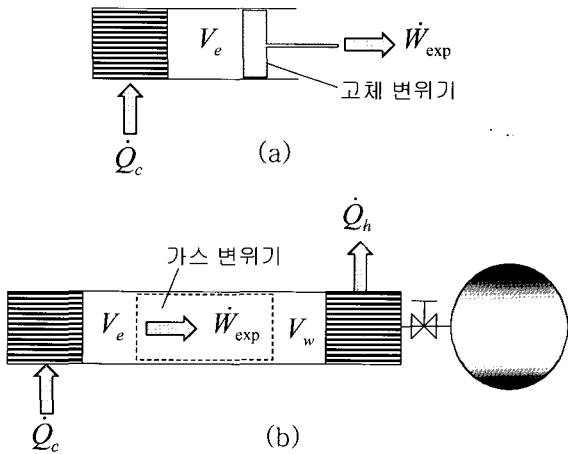


그림 4. 변위기에 의한 팽창일 (a) 스텔링 냉동기 (b) 오리피스 맥동관 냉동기

맥동관 냉동기를 고안하였다[5]. 오리피스는 맥동관의 지름보다 매우 작은 구멍으로서 맥동관 내부의 가스 일부를 저장소로 흘러가게 한다. Mukulin 등이 개발한 오리피스 맥동관 냉동기에서는 오리피스가 관 내부에 있기 때문에 구멍 사이즈를 조절하기 어려웠다. Radebaugh 등은 그림 3(b)와 같이 오리피스 개도를 조절할 수 있도록 맥동관과 저장소 사이에 니들 밸브 (needle valve)를 연결하였다[6].

오리피스 맥동관 냉동기의 냉동 원리는 맥동관에서 소위 팽창일(expansion work) 개념을 도입하여 설명할 수 있다. 일반적으로 스텔링 냉동기 또는 GM 냉동기는 그림 4(a)와 같이 저온부에 고체 변위기(solid displacer)가 있다. 고체 변위기는 압축기의 피스톤과 연결되어 적절한 위상차를 가지고 왕복 운동을 한다. 압축기에서 압축된 가스는 재생기를 지나면서 이전 사이클에서 냉각된 재생기의 재생 물질에 의해 온도가 낮아진다. 저온부에서 가스는 고체 변위기가 그림 4(a)에서 오른쪽으로 이동하여 팽창하게 되고 결국은 온도가 다시 내려가게 된다. 재생기의 손실과 기타 외부로부터 유입되는 열손실 그리고 관 벽과의 열전달을 무시하고 그림 4(a)에 에너지 보존 법칙을 적용하면 냉동용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}_c = \dot{W}_{exp} = \frac{1}{\tau} \oint PdV_e \quad [W] \quad (1)$$

여기서 팽창일은 압력과 체적 변화 곱을 한 사이클 동안 적분한 값이고 PdV일이라고도 부른다.

오리피스 맥동관 냉동기에서 저온부의 팽창일은 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 점선으로 표시한 맥동관 내부에 가상의 가스 변위기(gas displacer)를 상상하면 이해하기 쉽다. 맥동관에서 가스의 섞임(mixing)이 없고 흐름의 난류(turbulence) 성분이 작으면 맥동관은 가상의 변위기가 있는 것처럼 가스가 순차적으로 압축 및 팽창을 한다. 이를 위해 실제로 맥동관 냉동기를 제작할 때에는 흐름을 균일하게 하기 위하여 flow straightener를 관 양단에 설치하고 벽 안쪽이 매끈한 스테인리스 관을 사용한다. 가스 변위기에 의한 팽창일은 식 (1)과 같이 고체 변위기와 유사하게 표현된다.

스텔링 냉동기에서는 변위기가 압축기의 피스톤과 연결되어 팽창일이 냉동기 전체의 소요 동력을 줄여주는 역할을 한다. 이와 달리 맥동관 냉동기에서 가스 변위기에 의한 팽창일은 맥동관의 축방향을 따라 고온 열교환기 쪽으로 전달되고 열교환기 및 오리피스 그리고 저장소에서 열로서 방출이 된다. 따라서 오리피스 맥동관 냉동기의 경우 냉동용량은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_c = \frac{1}{\tau} \oint PdV_e = \frac{1}{\tau} \oint PdV_w \quad (2)$$

식 (2)와 같이 나타낸 팽창일은 압력-체적 선도에 나타낸 폐곡선 내부의 면적을 의미한다. 앞서 그림 1에 나타낸 사각파 형태를 가진 압력 변동에 대하여 압력과 고온부 체적의 변화를 그림 5(a)에 도시하였다. (1-)>(2) 과정과 (3-)>(4) 과정은 각각 가스의 압축 및 팽창 과정을 나타내고 (2-)>(3) 과정은 맥동관 내부가 고압으로 유지될 때 오리피스를 통하여 저장소 쪽으로 가스가 이동하여 고온부 체적이 감소함을 보여준다. (4-)>(1) 과정은 맥동관이 저압으로 유지될 때 저장소에서 맥동관 쪽으로 가스가 이동하여 고온부 체적이 증가함을 나타낸다. 위에서 서술한 네 개의 과정

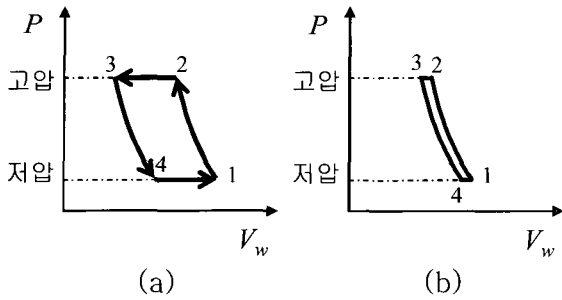


그림 5. 맥동관 냉동기의 고온부에서 압력-체적 선도 (a) 오리피스 맥동관 냉동기 (b) 기본형 맥동관 냉동기

은 한 사이클이 되고 그림 5(a)처럼 폐곡선을 이루게 되어 폐곡선 내부의 면적이 식 (2)와 같은 팽창일 즉, 냉동용량을 나타낸다.

기본형 맥동관 냉동기에서는 가스와 관벽사이의 주기적인 열교환인 표면 열펌핑에 의한 가스의 온도 변동으로 체적 변화가 일어나고 팽창일이 발생하는데, 일반적으로 그 효과는 그림 5(b)에 나타낸 바와 같이 오리피스 맥동관 냉동기보다 매우 작다. Mikulin 등은 오리피스 맥동관 냉동기로 105K의 최저도달온도를 기록하였고 Radebaugh 등은 60K를 달성하였다[5-6]. 이 때부터 전 세계의 많은 연구자들이 앞다투어 맥동관 냉동기 연구 개발에 참여하게 된다.

4. 맥동관 냉동기의 발전

오리피스 맥동관 냉동기가 개발된 이후 몇 년간은 작동원리를 이해하기 위한 실험과 성능을 예측하기 위한 해석 모델 연구가 주로 진행되었다. 1990년 Zhu 등은 오리피스 맥동관 냉동기의 수치해석 연구를 진행하면서 맥동관 내부 가스의 유량 진폭을 작게 하면 재생기의 손실을 감소시켜 성능을 향상시킬 수 있다고 생각하였다[7]. 그림 6과 같이 압축기와 맥동관의 고온부를 연결하는 우회 밸브(bypass valve)를 오리피스 맥동관 냉동기에 연결하는 이른바 이중입구(double inlet) 맥동관 냉동기를 제안하였다[7]. 우회 밸브는 압축기에서 토출되어 재생기로 유입되는 가스의 일부분(대략 10%)을 바로 맥동관의 고온 열교환기로 흐르게 하는 역할

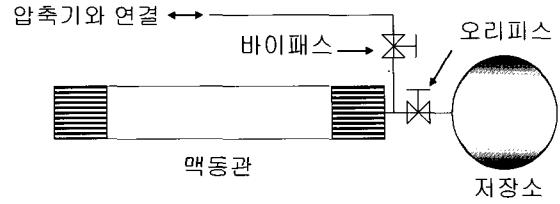


그림 6. 이중입구 맥동관 냉동기의 개략도

을 한다. 이렇게 하면 재생기를 통과하는 가스의 유량이 감소되어 압력강하 및 재생 열교환 손실이 줄어들게 된다. 또한 재생기를 우회한 가스는 맥동관 내부의 가스를 추가적으로 압축 또는 팽창시키게 되므로 팽창일이 증가한다. Zhu 등은 오리피스형과 이중입구형 맥동관 냉동기를 비교 실험하여 성능 향상을 확인하고 42K의 최저온도를 달성하였다[7-8].

그 당시까지 맥동관 냉동기는 GM 냉동기와 유사하게 압축기와 회전밸브를 이용하여 사각파에 가까운 압력파형으로 구동되었다. 압축기와 회전밸브는 대략 1 m내외의 주름관으로 연결되고 작동 주파수는 1 Hz내외인 것이 특징이다. 이와 같은 GM형 압축방식은 공간 제약이 별로 중요하지 않는 연구용 또는 산업용(ex. Cryopump)으로 적합하지만 우주선 탑재나 군수용(ex. 탱크의 전방 감시 적외선 카메라)등 공간에 제약이 있는 소형 냉동기 분야에는 적용하기 곤란하다.

반면 스티어링 냉동기는 왕복운동을 하는 피스톤을 이용하여 직접 가스를 압축/팽창하는데 작동 주파수는 보통 20 ~ 60 Hz 가량 되고 압력 파형은 정현파에 가깝다. 이와 같은 스티어링형 구동 방식은 압축기와 냉동부가 일체형이므로 소형화할 수 있고 또한 회전밸브가 필요하지 않으므로 압축 효율(=압축일/전기입력)이 대략 85 % 가량 된다. 반면 GM형 구동 방식은 회전밸브가 고압과 저압을 스위칭할 때 발생하는 손실이 크므로 압축 효율이 보통 25 % 정도이다[9]. 스티어링형 압축 방식에 사용되는 압축기는 회전형 압축기와 선형 압축기가 있는데 회전형은 피스톤에 크랭크 구동부를 이용하여 모터의 회전운동을 피스톤의 왕복 운동으로 변환한다. 선형 압축기에서는 영구자석과 코일의 상호작용에 의해 크랭

크 구동부 없이 피스톤을 축방향으로 왕복 운동하게 한다. 따라서 회전형보다 긴 수명을 가지는 선형 압축기를 이용한 맥동관 냉동기의 연구가 우주 및 군사용으로 1990년대 초부터 연구되기 시작하였다.

Kuriyama 등은 선형 압축기로 구동되는 이중입구 맥동관 냉동기의 성능 시험을 수행하였고 그 결과, 300W가 소비되는 압축기로 17 Hz 작동 주파수에서 36.5K의 최저 온도를 기록하였다[10]. 또한, Kanao 등은 50 Hz에서 최초로 오리피스 대신에 모세관을 부착하여 초소형 오리피스 맥동관 냉동기 성능을 실험하였다[11]. 이때부터 선형 압축기를 이용하여 고주파수에서 작동하는 맥동관 냉동기를 연구하면서 밸브 대신에 모세관을 고려하기 시작했다[12-13]. Gardner 등은 모세관에 의한 맥동관 냉동기의 성능 향상 가능성을 물리적으로 설명하고 모세관을 관성관(inertance tube)이라고 명명하였다[14]. Ravikumar 등은 맥동관 냉동기에 관성관을 적용하였을 때 고주파수에서 성능 향상 효과가 두드러짐을 실험적으로 보였다[15].

관성(inertance)은 본래 음향학(acoustics)에서 다루는 용어로서 컴플라이언스(compliance), 저항(resistance)과 더불어 음향 임피던스(acoustic impedance)라고 칭한다. 관성은 기계 시스템의 질량(mass)과 전기 시스템의 인덕턴스(inductance)와 동일한 개념이다. 그림 7과 같이 관성관 입구에서 압력과 유량을 각각 전압과 전류로 생각하면 관성관과 저장소의 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = P/Q = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (3)$$

여기서 저항과 인덕턴스는 관성관 효과를 나타내고 커패시턴스는 저장소를 의미한다. 오리피스 맥동관 냉동기는 위 식에서 인덕턴스 항이 없다. 식 (3)에서 임피던스의 위상은 압력과 유량의 위상차와 같은 의미이다.

앞서 식 (2)에서 설명하였듯이 맥동관 냉동기는 고온부에서 PdV일이 최대가 될 때 냉동용량이 최대가 된다. 그림 7에서 질량보존 법칙을 고려하면 고온부 체적(V

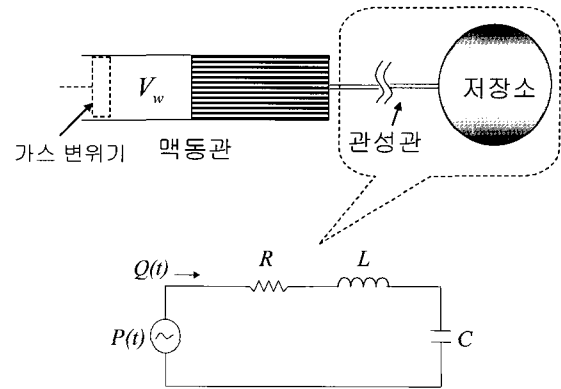


그림 7. 관성관의 전기회로 개념도

w)의 시간 미분은 관성관 입구에서의 유량(Q)과 같으므로 식 (2)를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}_c = \frac{1}{\tau} \int P dV_w = \frac{1}{\tau} \int P \dot{V}_w dt = \frac{1}{\tau} \int P Q dt \quad (4)$$

위식에서 나타낸 바와 같이 맥동관 냉동기의 냉동용량은 압력과 관성관 입구 유량의 곱을 한 사이클 동안 적분한 값인데, 이 값은 압력과 유량의 위상이 같아야 최대가 된다. 따라서 식 (3)에서 임피던스의 위상이 '0'이 되어야 냉동용량이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 관성관을 추가하여 인덕턴스 성분과 커패시턴스 성분을 적절히 조절하면 식 (3)의 허수부를 제거할 수 있으므로 냉동용량을 증가시킬 수 있다. 오리피스 맥동관 냉동기는 L 성분이 없으므로 압력과 유량의 위상이 같을 수 없다. 그림 8은 관성관을 적용했을 때 압력-체적 선도를 개략적으로 도시한 것이다. 압력과 유량의 위상이 같으면 압력과 체적은 90°의 위상차가 나므로 압력-체적 선도에서 폐곡선이 원에 가깝게 되어 내부의 면적은 최대가 된다. 이와 같이 맥동관의 고온부에 연결되어 압력과 유량의 위상을 조절하는 장치를 위상 조절기(phase control device)라고 통칭해서 부른다.

맥동관 냉동기의 성능을 높이기 위해서는 위상 조절기뿐만 아니라 재생기에 대한 연구도 중요하다. 특히, 액체헬륨 온도인 4.2K 부근의 냉동 온도에서도 적지 않은 응용 분야가 있는데, 이 때 재생기 연구가 중요해진다. 재생기는 헬륨과 같은 작동

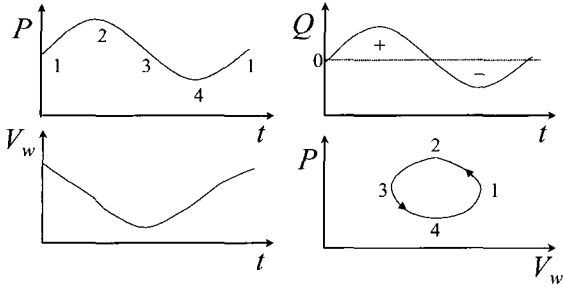


그림 8. 관성관의 효과: 압력-체적 선도 (+: 맥동관->관성관, -: 관성관->맥동관)

가스로부터 열을 빼앗아 저장하는 역할을 하는데, 본질적으로 가스보다 높은 열용량을 가져야 한다. 냉동온도가 대략 40 ~ 80K 근처에서는 스테인리스강이나 황동 같은 금속 물질의 비열이 헬륨보다 훨씬 크기 때문에 문제가 없는데, 10K이하로 내려가면 헬륨의 비열이 일반 금속보다 커지게 된다. 4K용 맥동관 냉동기를 구현하려면 납 또는 Er₃Ni 같은 희토류(rare earth material) 같이 10K이하에서 비열이 큰 물질을 2단 재생기에 사용한다 [16]. 1990년대 초에 4K용 2단 GM 냉동기가 성공적으로 개발되었고[16], 1990년대 후반에 GM 냉동기와 비슷한 성능의 2단 맥동관 냉동기가 구현되었다 [17].

5. 맥동관 냉동기의 현재 수준

맥동관 냉동기는 현재 80K용 스티어링형 구동 방식과 4K용 GM형 구동 방식의 냉동기가 주로 개발되고 있으며 상용화가 진행되고 있다. Cryomech, Sumitomo 중공업 등에서는 주로 4.2K에서 0.5 ~ 1.5W의 냉동용량을 가지고 수명이 약 12,000 시간인 GM형 맥동관 냉동기를 상용화하였고, 연구용 또는 MRI등에 적용되고 있다. Stirling형 맥동관 냉동기는 TRW, Lockheed Martin, Raytheon 등의 군수 업체를 중심으로 적외선 센서 냉각용으로 개발되었다[18]. GM형 맥동관 냉동기는 기본적으로 이중입구형에 기반을 두고 있고 Stirling형 맥동관 냉동기는 관성관을 대부분 적용하고 있다.

최근 들어 미국의 CFIC(Clever Fellows Innovation Consortium, Inc.)는 대형 초전도 전력기기 냉각에 사용될 수 있는 대용량 스티어링형 맥동관 냉동기를 개발하고 Praxair사와 제휴하여

상용화하였다. 이 냉동기는 77K에서 1000W의 냉동 용량을 가지고 있고 대당 가격은 약 \$115,000 이다. 특히, 10년의 MTTM(Mean Time To Maintenance) 를 보증한다고 한다[19].

현재 GM형 맥동관 냉동기로 구현될 수 있는 최저도달온도는 1단 냉동기에서 11.1K, 2단 냉동기에서 2.2K인데, 재생기의 성능 최적화와 비열이 큰 재생 물질 개발이 큰 역할을 하였다[20-21]. 스티어링형 맥동관 냉동기는 우주선 탑재용 고성능 센서의 냉각을 위하여 온도를 80K보다 낮게 하는 연구가 Lockheed Martin과 Sunpower사에서 활발하게 진행되고 있다 [22-23]. 현재 스티어링형 맥동관 냉동기의 최저온도는 1단에서 29K이고, 2단에서 19.6K 그리고 3단에서 5.4K이며 온도를 더 낮추기 위한 연구는 계속되고 있다 [24]. 고주파수에서 운전하는 스티어링형 맥동관 냉동기는 가스의 질량 유량이 크므로 재생기에서 압력강하가 증가하고 열효율도 떨어지기 때문에 다단으로 제작하는 것이 쉽지 않다. 비록 우주선에 탑재되는 특수 용도로 다단 스티어링형 맥동관 냉동기가 연구되고 있지만 머지않아 현재 상용화되어 있는 4K GM형 맥동관 냉동기를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] W.E. Gifford and R.C. Longworth, "Pulse tube refrigeration," Presented at winter annual meeting of the ASME, Philadelphia, Pennsylvania, Paper No. 63-WA-290, November 17-22 (1963)
- [2] W.E. Gifford and R.C. Longworth, "Pulse tube refrigeration progress," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 10, pp. 69-79 (1965)
- [3] W.E. Gifford and R.C. Longworth, "Surface heat pumping," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 11, pp. 171-179 (1966)
- [4] R.C. Longworth, "An experimental investigation of pulse tube refrigeration heat pumping rates," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 12, pp. 608-618 (1967)
- [5] E.I. Mikulin et al., "Low temperature expansion pulse tube," Advances in Cryogenic Engineering,

- Vol. 29, pp. 629-637 (1984)
- [6] R. Radebaugh et al., "A comparison of three types of pulse tube refrigerators: new methods for reaching 60K," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, pp. 779-789 (1986)
- [7] S. Zhu et al., "Double inlet pulse tube refrigerator: an important improvement," *Cryogenics*, Vol. 30, pp. 514-520 (1990)
- [8] S. Zhu et al., "A single stage double inlet pulse tube refrigerator capable of reaching 42K," *Cryogenics*, Vol. 30, ICEC 13 Supplement, pp. 257-261 (1990)
- [9] R. Radebaugh, "Application of cryocoolers to superconducting systems," Short course material, Applied Superconductivity Conference, Seattle, Washington (2006)
- [10] T. Kuriyama et al., "Development of pulse tube refrigerator with linear-motor drive compressor," *Proceeding of 7th International Cryocooler Conference*, Paper No. PL-CP-93-1001 (1993)
- [11] K. Kanao et al., "A miniature pulse tube refrigerator for temperatures below 100 K," *Cryogenics*, Vol. 34, ICEC Supplement, p. 167-170 (1994)
- [12] T. Haruyama and H. Inoue, "Cooling characteristics of a modified miniature pulse tube refrigerator," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 41, pp. 1427-1433 (1996)
- [13] S.W. Zhu et al., "Phase shift effect of the long neck tube for the pulse tube refrigerator," *Cryocooler 9*, pp. 269-278 (1997)
- [14] D.L. Gardner and G.W. Swift, "Use of inertance in orifice pulse tube refrigerator," *Cryogenics*, Vol. 37, pp. 117-121 (1997)
- [15] K.V. Ravikumar and Y. Matsubara, "Pulse tube refrigerator based on fluid inertia," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, pp. 1911-1918 (1998)
- [16] R.A. Ackermann, "Cryogenic regenerative heat exchangers," Plenum press, New York, pp. 95-100 (1997)
- [17] G. Thummes et al., "Small scale 4He liquefaction using a two-stage 4K pulse tube cooler," *Cryogenics*, Vol. 38, pp. 337-342 (1998)
- [18] R. Radebaugh, "Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4130, pp. 363-379 (2000)
- [19] http://www.qdrive.com/index.php?page_id=19
- [20] L.M. Qiu et al., "Regenerator performance improvement of a single-stage pulse tube cooler reached 11.1K," *Cryogenics*, In press (2006)
- [21] L.M. Qiu et al., "Performance improvement of a pulse tube cooler below 4K by use of GdAlO₃ regenerator material," *Cryogenics*, Vol. 41, pp. 693-696 (2001)
- [22] T. Nast et al., "Overview of Lockheed Martin cryocoolers," *Cryogenics*, Vol. 46, pp. 164-168 (2006)
- [23] K. Wilson and D. Gedeon, "Status of pulse tube cryocooler development at Sunpower," *Cryocoolers 13*, pp. 31-40 (2005)
- [24] L.W. Yang and G. Thummes, "High frequency two-stage pulse tube cryocooler with base temperature below 20K," *Cryogenics*, Vol. 45, pp. 155-159 (2005)

저자이력

남관우(南寬祐)

1996년 고려대학교 기계공학과 졸업, 2004년 한국과학기술원 기계공학과 대학원 졸업(공학박사), 현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원

