

초전도 통신소자용 냉각기술의 현황 및 전망



정상권

한국과학기술원 기계공학과
저온공학실험실

1. 머리말

초전도 현상의 발견은 처음부터 매우 흥미로운 초전도 전자소자의 시대를 예고하였다. 무저항 전기 전도체, 미소분산 전송선(zero frequency dispersion signal transmission lines), 매우 높은 Q 값을 갖는 공진기 또는 필터, 양자 레벨의 민감성을 갖는 여러 가지 감지 소자 등의 월등한 능력에서 볼 수 있듯이, 이러한 초전도 전기소자에 대한 연구는 초저온 전자학(LTE, Low Temperature Electronics)의 한 분류로서, 1911년 처음 수은의 초전도 현상이 발견된 이래로 계속하여 관심의 대상이 되어 오던 중, 1986년 고온 초전도체(HTS, High Temperature Superconductor)가 합성이 되면서 더욱 현실화, 대중화가 되었다. 그 이전에는 주로 액체 헬륨을 이용하여 4.2 K (-269 °C)의

극저온에서 작동을 시켜야 했던 초전도 전자소자는 액체 질소의 비등점인 77 K (-196 °C)에서 초전도 현상을 나타내는 고온 초전도체로 제작을 할 수 있게 되면서 전자공학 전반에 획기적인 변화를 줄 수 있다고 믿었다. 이렇게 80 K 영역의 온도가 큰 의미를 갖는 것은 다음 두 가지 이유 때문이다[1].

첫째, 초전도 전자소자를 작동시키는데 필요한 저온 냉각 시스템이 현저하게 줄어든다는 것이며, 둘째, 반도체와 초전도체의 장점을 이용하여 혼합회로(hybrid circuit)를 용이하게 구성할 수 있다는 것이다. 저온 냉동기의 크기 또는 복잡성이라는 것은 보통 그것이 작동하는 온도비에 비례한다고 할 수 있다. 예를 들어서, 4.2 K를 생성시키는 저온 냉동시스템이 71(≒300 K / 4.2 K)정도의 노력이 필요하다면, 77 K용 저온냉동기는 약 4(≒300 K / 77 K) 정도라 할 수 있다. 따라서 고온 초전도체 초전도 전자소자는 저온 초전도체 전자소자보다 훨씬 간단한 냉각 시스템으로 작동이 가능하다는 얘기인데, 사실은 상온의 냉각시스템이 약 1(≒300 K / 273 K)정도의 노력으로 만들어져 있다는 사실을 감안한다면 77 K에서의 냉각이라는 것도 그렇게 간단한 것만은 아니다.

일반적으로 CMOS, GaAs, HEMT 같은 반도체 소자들은

저온에서 작동을 시킬 때 그 성능이 크게 향상된다. 예를 들자면 CMOS 논리회로의 경우, 77 K에서 작동될 때 그 연산속도가 상온의 경우보다 2 내지 3 배 정도 빠르며 GaAs 소자로 이루어진 연산회로는 77 K에서 10 GHz의 작동률을 보였다. 저온에서 작동되는 전자회로들은 반도체소자 자체의 연산속도 증가 뿐만 아니라, 열적잡음(thermal noise)의 감소, 통신회로에서의 용량증가, 감지소자의 민감성(sensitivity) 및 영역(range) 확대 등 부가적인 특성을 또한 갖

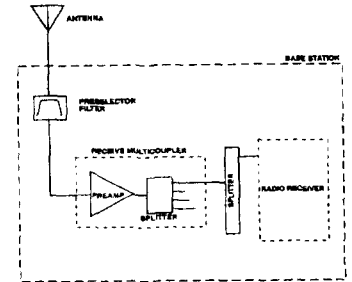


그림 1. 무선 기지국의 개요

섬으로 하고 있기 때문에, 초전도 전자소자와 함께 회로를 구성하여 저온으로 냉각되는 회로(hybrid circuit)에 대한 연구도 진행되고 있다. 고온 초전도체로 만들어진 RF 필터는 그림 1과 같이 무선전화의 기지국에서, 기존의 필터보다 월등하게 높은 Q 값으로 미소한 송신 신호의 잡음

을 제거하는 데에 사용이 기대되는 것으로서[2], 미국의 Illinois Superconductor Corp., Superconductor Technologies Inc., Superconducting Core Technologies, Conductus 같은 회사들은 이미 1993년부터 고온 초전도 RF 필터의 연구 개발을 시작하고 또한 현장 실험을 거쳐가며 이 대체기술의 상업화에 박차를 가하고 있다. 처음 HTS 필터의 응용은 셀룰러 통신(cellular communication)분야 이었으나, 그 후 이러한 초전도 전자소자의 응용영역은 PCS (Personal Communication Services), HTS 국방 방어시설의 전자 장비, 저온 컴퓨터 소자 등에까지 확대되었다. 보통 PCS용은 초기의 셀룰러 통신에 비하여 더 큰 냉각부하를 발생시키는데, 그 이유는 장비의 LNA(Low Noise Amplifier)까지도 저온으로 냉각하는 시스템을 구성하기 때문이다. 이러한 초전도 통신소자용 저온 냉각시스템의 약 75% 냉각부하는 RF선을 따라서 들어오는 전도 열전달이며 약 25%는 LNA에서 발생하는 자체 열발생이다. 통신소자의 위치 및 용량에 따라서 전체 저온냉각부하의 크기는 다르지만, 현재 대부분 70~80 K에서 4~5 W 정도의 냉각능력을 갖는 저온 냉각기가 요구되고 있다. 21세기 정보화 시대의 도래는 지구촌 어느 곳에도 예외가 있지 않으며, 그것의 가장 기본적인 수단 중의 하나가 무선통신일 것이다. 엄청나게 증가하는 무선 통신의 수량과 그 통화 음질(quality)을 보장하는 중요한 기술이 바로 필터와 증폭기임을 감안할 때, 본질적인 장점을 가지고 대체기술로서 응용이 될 초전도 통신소자의 시대는 머지 않았음을 확신하며, 이를

현실화하는 가능 기술(enabling technology)인 저온 냉각기술의 현황과 전망에 대하여 이제부터 살펴보고자 한다.

2. 저온 냉각기술의 현황

저온 냉각기의 기본 원리는 냉매를 압축시킨 후 그 압축열을 외부로 발산시키고 팽창하는 과정에서 저온을 생성하여 원하는 외부의 물체로부터 열을 빼앗도록 하는데에 있다. 특히 저온 냉각기가 상온의 냉각 시스템과 다른 점은, 그 작동 온도 범위의 폭(열을 외부로 방출하는 고온부와 열을 외부로부터 흡수하는 저온부)이 크기 때문에 근본적으로 열역학적 효율이 낮고, 비가역적인 손실에 의하여 시스템이 제대로 작동하기가 용이하지 않으며, 저온에서 일을 뽑아내는 장치가 일반적으로 포함이 되어야 한다는 것이다. 유체를 냉매로 사용하는 저온 냉동기에서는 그 종류를 크게, 회수식 냉동기(recuperative refrigerator)와 재생식 냉동기(regenerative refrigerator)로 나눌 수 있다.

2-1. 회수식 냉동기

이러한 형태의 냉동기로서 대표적인 것은 바로 J-T (Joule-Thomson) 냉동기이며 상온의 증기 압축식 냉동기가 이에 속한다. 다만 그림 2에 나타난 바와 같이 저온 냉동기는 한 사이클에서 고압의 고온 유체가 저압의 저온유체에 의하여 일단 냉각이 된 후 팽창과정을 거치도록 되어 있으며, 그 목표 온도에 따라서 중간에 팽창일을 할 수 있도록 여러 단계로 되어 있기도 하다. 팽창에 의하여 저온을 생성하는 방법은 열역학적으로 사실상 비효율적이기 때문에 매우 압력비

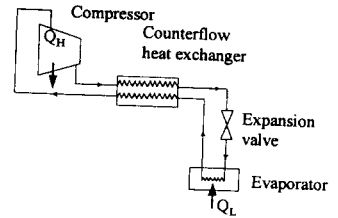


그림 2. J-T 냉동기의 개략도

가 높은 대형의 압축기가 보통 사용이 된다. J-T 냉동기는 주로 가스를 액화하는 대형 플랜트에 주로 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 70~80 K용의 저온 냉각기를 목표로, 혼합가스 냉매를 이용하는 냉각기도 연구, 개발된 바 있다[3-4].

역 브레이튼 냉각기는 또 다른 종류의 회수식 냉동기로서, J-T 냉각기의 팽창부를 터보 팽창기(turboexpander)로 대체하여 전



그림 3. Creare에서 개발한 역 브레이튼 냉각기

체 시스템의 효율을 높이고 소형화하려는 것이다. 그림 3은 1996년에 미국 Creare Inc. 에서 개발한, 65 K에서 5 W의 냉각능력을 갖는 역 브레이튼 냉각기로서 원심압축기를 사용한 것이 특징이다[5].

2-2. 재생식 냉동기

재생식 냉동기는 좀 생소한 개념이고, 사실상 초전도 통신소자에 가장 이용 가능성이 높기 때문에 여기서 좀 더 자세하게 살펴보고자 한다.

재생식 압축냉동기는 그 구조의 복잡성 때문에 상온 부근의 냉동에는 별로 응용되지 않고 -150 °C 이하의 저온을 얻어야 하는 저온냉동에 사용되어 왔다. 이러한 경우 재생형 열교환기 (regenerative heat exchanger), 즉 재생기(regenerator)는 압축기와 함께 재생형 냉동기의 성능에 결정적 영향을 미치는 핵심 구성품이며, 일반 열교환기(recuperative heat exchanger)에서는 저온유체 및 고온유체가 서로 다른 통로를 흐르면서 열을 교환하는데 비해, 재생기는 동일한 통로를 고압의 고온가스 및 저압의 저온가스가 주기적으로 왕복 유동하면서 축열 및 방열을 하여 열을 교환하므로써 전체 냉동기의 열역학적 효율을 크게 향상시킬 수 있는 것이다. 재생기는 일반 열교환기에 비하여 유체의 압력강하가 큰 단점이 있으나 다음과 같은 장점이 있다.

- (a) 금속망이나 선재 또는 작은 구슬 등을 충전재로 사용하므로 단위 부피당 전열 면적이 대단히 넓다.
- (b) 유체통로 구조가 간단하여 제작 및 조립이 용이하다.
- (c) 동일한 통로를 유체가 주기적으로 왕복하므로써 자정 (self-cleaning) 효과가 있다.

(1) 스티어링(Stirling) 냉동기

스티어링 냉동기는 그림 4와 같이 두 개의 등온과정과, 두 개의 등적 과정으로 이루어지는 스티어링 사이클(Stirling cycle)에 기초를 둔 것으로, 단순 증기 압축식의 J-T 팽창부에서 발생하는 열역학적 비가역 과정을 저온피스톤 팽창과정으로 대체하였으므로 냉동기의 효율이 높은 편이다[6]. 현재까지 스티어링 냉동기는 주로

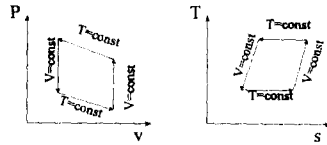


그림 4. 스티어링 냉동기의 P-v, T-s 선도.

액체질소 온도 77 K를 생성시켜 적외선 소자를 냉각하는 시스템으로서 많이 연구, 개발되었으나, 요즘은 환경친화적인 냉매인 헬륨 가스를 사용한다는 이유와, 근본적으로 냉동 성적 계수가 크다는 장점 때문에 미국의 Sunpower사나 영국의 EA Technology사 같은 곳에서 상온용 냉동기에 적용하는 연구노력이 이루어지고 있다. 스티어링 냉동기는 그 기하학적인 구성에 따라서 α , β , γ 형이 있으며, 적외선 소자 또는 SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)용 고온 초전도체 소자의 냉각과 관련하여 진동 노이즈(microphonics), 전기 노이즈(EMI, Electro Magnetic Interference)를 감소시키기 위하여 그림 5와 같이 분리형이 개발되어 상용화되고 있기도 하다[7]. 환경 오염물질을 전혀 배출하고 있지 않으며 용량제어도 부가적인 인버터 대신 왕복동 혹은 선형 모터(linear motor)의 입력 전압을 직접 제어함으로써 가능하다.

(2) G-M(Gifford-McMahon) 냉동기

G-M 냉동기는 주로 10~20 K의 온도범위에서 진공 시스템의 cryopump에 가장 널리 사용된 냉동기로서 그림 6과 같은 기본적인 구조를 갖고 있다[8]. 이것은 스티어링 냉동기 또는 다른 극저온 냉동기가 갖고 있는 단점들

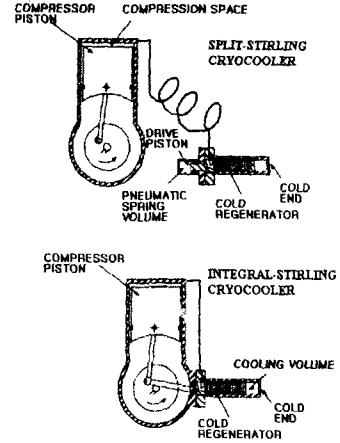


그림 5. 스티어링 냉동기의 구조

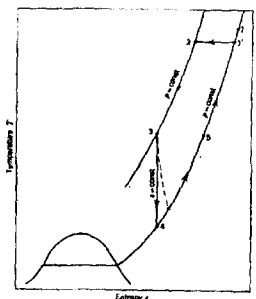
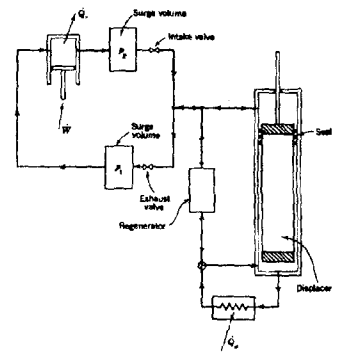


그림 6. G-M 냉동기의 구조와 원리

을 극복하고 다음과 같은 장점 때문에 상업화에 성공하고 있다.

- (a) 스티어링 냉동기와 달리 압축-팽창의 사이클 수가 10 배 이상 낮아졌으므로 기계적인 수명이 증가했다.

- (b) 팽창부인 저온영역에서 밀봉, 윤활이 필요없고 상온부에서 기밀을 유지할 수 있는 구조로 변경하여 저온부에서 마찰열에 의한 비가역성을 줄일 수 있다.
- (c) Displacer의 양단간 압력차를 줄일 수 있다.
- (d) 상온 증기압축식 냉동기에서 개발된 기존의 압축기를 개조하여, 밸브를 작동시켜 사이클의 압력변화를 야기하므로, 압축부와 팽창부를 분리시키고 스텔링 냉동기보다 기계적인 신뢰성이 크게 향상되었다.
- (e) 다양한 냉각온도 범위에 적용하기 위하여 다단계 구조(staging)의 구성이 용이하다.

* G-M 냉동기의 이상적인 사이클 과정은 다음과 같다.

○ 과정 1→2 : displacer가 실린더의 아래 부분에 위치하며 흡입 밸브가 열려서 displacer의 윗부분 압력이 P_1 에서 P_2 로 증가한다.

○ 과정 2→3 : 흡입 밸브가 열려있는 상태로 displacer는 실린더의 위로 이동하게 되어 displacer의 윗부분에 있는 가스가 재생기를 통과하여 displacer의 아래 부분으로 이동한다. 가스가 재생기를 통과하면서 온도가 내려가므로 정압상태에서 부가적인 가스의 유입이 흡입밸브를 통하여 일어난다.

○ 과정 3→4 : displacer는 여전히 실린더의 윗부분에 위치하고 흡입 밸브가 닫히면서 토출 밸브가 열려 실린더 내의 가스가 팽창을 한다. 실린더의 아래 부분에 남아있는 가스는 계속 팽창하면서 토출밸브를 통하여 가스를 밀어내는 일(work)을 수행함으로써 저온이 생성된다.

○ 과정 4→5 : 저온의 가스는 displacer가 아래로 이동함에 따라 저온 열교환기에서 외부로부터 열을 흡수하게 된다.

○ 과정 5→1 : 토출밸브는 계속 열려 있으므로 열교환기를 통과한 가스는 재생기를 지나서 실린더의 윗부분으로 이동하며 재생기를 냉각하게 된다.

(3) 맥동관 냉동기(pulse tube refrigerator)

맥동관 냉동기(pulse tube refrigerator)는 1963년 Gifford와 Longworth[9]가 고안해낸 소형 저온 냉동기(cryocooler)의 일종으로서 현재 세계적으로 매우 활발히 연구되고 있는 추세이다. 맥동관 냉동기는 헬륨 가스를 주로 작동유체로 쓰고 있는데, 구성 요소로는 그림 7에 나타난 바와 같이 압축기 이외에 네 가지의 구성 요소로 이루어져 있다.

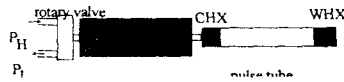


그림 7. 맥동관냉동기 개략도

주기적으로 압축하고 팽창하는 작동 유체로부터 열을 흡수, 방출하는 재생기(regenerator), 압축된 작동 유체로부터 외부로 열을 방출하는 고온부 열교환기(WHX, warm-end heat exchanger), 작동 유체가 팽창을 하는 과정에서 주위로부터 열을 흡수하는 저온부 열교환기(CHX, cold-end heat exchanger), 맥동 유동(oscillating flow)이 형성되는 맥동관(pulse tube)으로 이루어져 있다. 맥동관 내부에서의 냉동 원리를 도식적으로 표현하면 그림 8과 같다. 맥동관 내부에서 미소 체적의 작동 유체는 맥동 압력을 주기적

로 가함에 따라 다음과 같은 사이클 과정을 거치게 된다.

- (a) 작동 유체의 단열 압축 (Adiabatic compression) (1→2)
- (b) 관 표면으로의 등압 열방출 (Isobaric heat rejection to the wall) (2→3)
- (c) 작동 유체의 단열 팽창 (Adiabatic expansion) (3→4)
- (d) 관 표면으로 부터의 등압 열흡수(Isobaric heat absorption from the wall) (4→1)

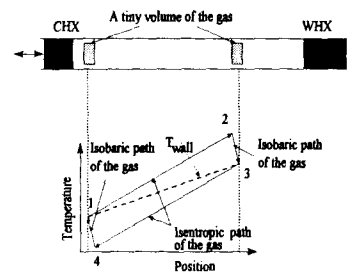


그림 8. 맥동관 냉동기의 원리

맥동관 내부에 존재하는 작동 유체가 이와 같은 사이클을 연속적으로 행하여 사이클 정상 상태(cyclic steady state)에 이르게 되면 자연스럽게 맥동관의 축 방향으로 온도 구배가 형성되어 저온부 쪽의 온도가 낮아지게 된다. 이러한 현상을 '표면 열 펌핑 효과(surface heat pumping effect)'라고 한다[9]. 재생기는 맥동관으로 유입되는 작동 유체의 열 에너지를 흡수하여 그 온도를 저하시키는 역할을 한다. 맥동관 냉동기는 기존의 다른 저온 냉동기(Stirling cryocooler 혹은 G-M cryocooler)에 비하여 구조가 간단하고 특히 저온부에서 움직이는 부분이 없기 때문에 기계적인 신뢰성과 내구성을 갖추었

다고 할 수 있다. 이러한 이유로 인하여 맥동관 냉동기는 오랜 시간동안 안정적인 작동을 요구하는 우주 환경에서 적외선 감지기의 냉각을 목적으로, 혹은 앞으로 상용화가 예상되는 고온 초전도 소자와 같은 전자 소자의 냉각에 활용되기 위하여 그 연구가 활발히 진행중이다.

이상에서 살펴본 여러 가지 저온 냉각기 중 초전도 통신소자의 냉각 목적으로는, 그 크기가 작고, 가격이 저렴한 것이 적합하다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 70~80 K에서 약 5 W의 냉각능력을 갖는 저온 냉각기가 요구되는데, 현재 G-M 냉동기, Stirling 냉동기, 맥동관 냉동기 모두 초전도 통신 소자를 냉각시키는데 사용된 적이 있으나, 앞으로 모든 시스템이 안테나 탑위에 설치되는 형상("tower top" configuration)이 보다 선호되고

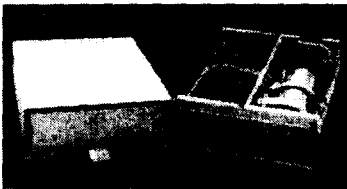


그림 9. STI의 스티링 냉각기를 탑재한 초전도 통신소자 장치

있으므로, 스티링(Stirling)냉동기와 맥동관 냉동기를 탑재한 시스템에 대하여 더욱 자세히 알아보겠다.

2-3. 스티링(Stirling) 냉동기 탑재 사례

STI (Superconductor Technologies Inc.)는 그림 9와 같은 시스템을 개발하였으며 77 K에서 4 W 이상을 냉각하는데 130 W 정도의 입력 전력이 요구되는

매우 효율이 높은 제품이다[10]. 이것은 일 단(one stage)의 일체형 스티링(Stirling) 냉동기가 필터 시스템의 오른쪽 반 공간을 차지하고 있고, RF 필터를 감싸는 저온 진공용기가 위쪽에 위치한다. 작동 환경조건은 -10 °C부터 60 °C까지의 외부 대기 온도이며 이들이 목표로 세운 설계조건은 표 1에 나타난 바와 같다. STI에서는 이와 같이 저렴한 가격의 내구성 있는 스티링(Stirling) 냉동기를 개발하는 과정 동안 다음과 같은 설계 단계를 거쳤다. 첫째, 마찰 저항을 최소화시키기 위하여 구동 부분의 표면은 마찰계수가 작은 물질로 표면처리되었고 피스톤과 보어는 같은 재료로 선택하여 열팽창에 의한 간격 변화를 최소화 시켰으며 정상상태에서는 가스 베어링

표 1. Cryocooler design goals

Parameter	Design goal
Operating temperature range	50-100 K
Lift at 50-100K (23°C ambient temp.)	0-5 W
Lift at 77 K (23°C ambient temp.)	3.5 W
Lift at 77 K (60°C ambient temp.)	2.7 W
Input power	< 150 W
Weight	< 5 kg
Size	Φ 5 x L 12(inch)
Cool-down time	< 5 min.
Cost	\$1,000
Reliability	40,000 hour MTTF

이 사용되도록 하였다. 둘째, 압축기의 구동 선행모터는 저가의 외부 코일 형식으로 되어있으므로 전기 feed-thru가 필요없으며 코일 절연물질에 의한 냉각기 오

염을 방지할 수 있고, 모터의 냉각도 용이하다. 이러한 구조는 5% 내지 7%의 모터 손실증가를 수반하게 되지만 전체 시스템의 내구성을 향상시키고 조립시간을 단축시키는 장점이 더 크다고 할 수 있다. 셋째, 냉각기의 겹테기는 진공 브레이징과 용접으로 헬륨 가스 누설 가능성을 최소화하였다. 넷째, 자유 피스톤 설계 방식에 따른 과도 스트로크를 방지하기 위하여 모터의 전류를 제어하도록 하였다. 그림 10은 이와 같이 제작된 STI의 저온 냉각기로서 표시된 인치 단위의 치수로써 전체 크기를 짐작할 수 있게 해준다. 실험 결과에 의하면 주위 온도 변화에 따라서 정상 상태 냉각용량의 변화를 관찰할 수 있는데 큰 문제는 발생하지 않았으며, 다만 냉각부의 열용량에

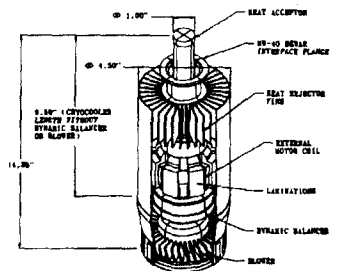


그림 10. STI 스티링 냉각기의 개략도

따라서 초기 냉각 시간이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

2-4 맥동관 냉동기 탑재 사례

STI의 스티링(Stirling) 냉동기 탑재 초전도 통신소자 시스템이 1996 년 초반에 완성된 이후, 미국 NASA의 AITP(Aerospace Insustry Technology Program)라는 정부-산업체 협력 프로그램의 일환으로 Lockheed Martin Missiles & Space, STI, NIST

(National Institute of Standards and Technology), NASA의 Goddard Space Flight Center가 맥동관 냉동기를 응용하는 시스템에 대한 연구를 시작하여 1997년 여름부터 동심원관형(concentric) 맥동관 냉동기를 장착한 STI의 필터 시스템이 시험되고 있다[11]. 또한 이와는 별도로 SCT(Superconducting Core Technologies)는 처음 G-M 냉동기를 이용한 시스템을 개발한 후 1997년 1월부터 맥동관 냉동기에 대한 연구 개발을 시작하여, 1998년 초에 관성튜브(inertia tube)를 사용하는 일직선형(in-line) 맥동관 냉동기를 제작하고 있다[12]. 이들 두가지 시스템은 모두 맥동관 냉동기 방식을 채택하여, 스텔링(Stirling) 냉동기에서 움직이는 일부 부품품을 제거함으로써 내구성을 향

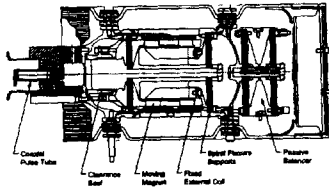


그림 11. Lockheed Martin의 동심원관형 맥동관 냉동기

상시키고, 전체 냉동기 가격을 하락시키고자 하는 노력이라고 할 수 있다. STI의 맥동관 냉동기 방식은 앞에서 서술한 바와 같이, 그 전에 개발된 스텔링(Stirling) 냉동기의 선형 구동 모터기술을 그대로 이용하여 압축기의 가격을 하락시키고자 한 것으로서, 일직선형(In-line)과 동심원관형(concentric) 모두 개발을 한 결과, 그 성능에 큰 차이가 없었으므로 패키징의 용이

와 조립단가를 절약하기 위하여 그림 11과 같이 동심원관형으로 결정하였다. SCT가 개발한 초전도 통신소자용 맥동관 냉동기는 CFIC(Clever Fellows Innovation Consortium)에서 설계된 선형 압축기에 기본을 두고 제작되었으며 그림 12와 같이 수신탑 위에 바로 설치될 수 있는 형상의 일직선형이다. 또한 선형 압축기의 전력 시스템을 DC에서 변환하는 제어방식을 택함에 따라 다음과 같은 장점을 갖게 되었다. 첫째, 무선통신 기지국의 비상 전원인 배터리를 이용하여 냉각기를 구동할 수 있으므로 전체 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 둘째, DC 전원에서부터 AC 선형모터를 구동하는 인버터 방식 덕분에 세계 어느 곳에서나

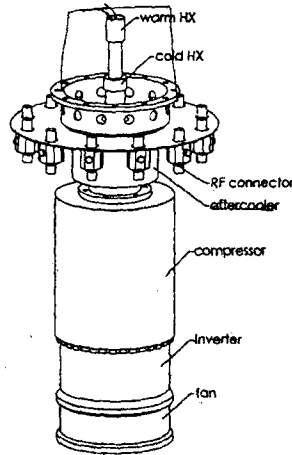


그림 12. SCT의 맥동관냉동기

50 Hz 혹은 60 Hz의 지역 전원에 상관없이 한 가지 모델의 저온 냉각기가 사용될 수 있다. 셋째, 저온 냉각기를 비롯한 초전도 소자 시스템을 무선 기지국의 탑 위에 설치할 때 저압의 DC 전압에 대한 허가, 규제 문제 등이 비교적 간단하다. SCT의 맥

동관 저온 냉각기 실험 결과에 의하면, 180 W의 입력에 대하여 80 K에서 약 8 W의 열을 뽑아낼 수 있으므로 STI에서 개발한 것보다 100% 이상의 성능향상을 보여주고 있다.

3. 저온냉각기술의 전망

현재까지 개발된 여러 종류의 저온 냉각기는 대부분 초전도 통신소자에 적용이 될 수 있는데, 정작 기존의 재래식 전자소자 시스템을 대처하고 상업적인 구매력을 발휘하려면 다음과 같은 조건들이 만족되어야 한다[13].

- 내구성
- 소형 및 경량
- 다양한 작동 온도 범위
- 신속한 초기 냉각
- 저렴한 가격
- 무소음 및 무진동
- 안정된 냉각 온도 유지
- 저전력 소비

현재 이러한 까다로운 조건을 모두 만족시키는 완벽한 저온 냉각기는 아직 없다. 고효율 및 열역학적인 장점에 의하여 G-M 냉각기와 스텔링(Stirling) 냉각기가 가장 먼저 초전도 통신소자용 저온 냉각기로 연구되어 오다가, 냉동기의 크기 문제, 냉각기의 낮은 MTTF(Mean Time To Failure), 즉 내구성 문제 때문에, 또한 생산 단가를 낮추려는 목적으로 맥동관 냉동기의 사용이 더 적극적으로 검토되고 있는 현실이다. 앞으로 초전도 통신소자의 현실화에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 저온 냉각기의 수명 특성과 가격 문제는 각각 5년 이상, \$2000 이하를 그 목표로 잡고 있다. 특히 저온 냉각기의 가격은 제작되는 물량에 따라

서 크게 변화할 수 있는데 연간 10,000 대를 생산하는 경우 STI 와 SCT는 \$1648 과 \$1500 로 가격을 하락시킬 수 있다고 주장하고 있다. 저온 냉각기의 수명 또한, 맥동관 냉동기를 사용하는 경우에는 선형 압축기의 기술 진전으로 인하여 MTTF 40,000시간 도달이 가능한 것으로 믿고 있다. 이렇게 낙관적인 전망속에서도 실제로 저온시스템을 제작, 조립하는 데에는 다음과 같은 부가적인 패키징 문제를 또한 간과할 수 없다.

- 대류 열전달 문제
- 부가적인 복사 열전달 부하
- 상온으로 부터의 열전도 부하
- 진공 밀봉 문제
- 냉각 시스템의 열용량 문제

저온 냉각 시스템의 냉각 부하는 실제로 매우 작은 것이지만, 저온에서 물체의 비열이 작다는 특성과, 외부로부터 열 유입이 여러 연결 단자로부터 일어나게 되어 냉각기에 부가적인 부하를 만들어 낸다는 사실을 인식한다면, 제조 기술뿐만 아니라 시스템 조립기술에도 매우 깊은 주의가 요구된다.

4. 맺음말

이상에서 살펴본 바와 같이 고온 초전도체를 이용한 초전도 통신소자는 종래의 전자소자가 제공하지 못하는 월등한 성능을 보유하고 있으며 이것이 작동하기 위해서는 액체 질소 온도(77 K)에서 항상 냉각이 되어야 한다. 초전도 통신소자용 저온 냉각기술은 이제 기술적인 측면에서는 거의 완숙한 단계에 이르렀으나, 이것이 상용화되기에는 아직도 가격 문제와 수명 문제 등이 남

아있다. 아울러 몇 가지 까다로운 저온 패키징 문제를 극복한다면, 앞으로 머지 않은 장래에, 소형이면서도 수명이 길고, 전기적 잡음과 진동 문제를 크게 일으키지 않는 맥동관 저온냉각기가 무선 통신 기지국의 탑 위에 설치되어, 21 세기의 정보화 시대에서 초전도체의 실용화를 가능하게 하는 수단으로 등장하게 될 것을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Nisenoff, M., 1988, "Superconducting electronics: current status and future prospects," *Cryogenics*, Vol. 28, pp.47- 56.
- [2] Rolfes, M., 1995, "Superconductors: The wireless industry comes of age," *Superconductor Industry*, Winter, pp.24-56.
- [3] Little, W.A and Sapozhnikov, I., 1997, "Low Cost Cryocooler for Cryoelectronics," *Cryocoolers 9*, pp. 509-513, Plenum Press, New York.
- [4] Longworth, R. C., 1997, "80 K Throttle-Cycle Refrigerator cost Reduction," *Cryocoolers 9*, pp. 521-528, Plenum Press, New York.
- [5] Dolan, F. X., Swift S. L., Tomlinson, B. J., Gilbert, A., and Bruning, J., 1997, "A single stage reverse Brayton cryocooler: performance and endurance tests on the engineering model," *Cryocoolers 9*, Plenum Press, New York, pp.465-474.
- [6] Walker, G., 1983, *Cryocoolers, Part 1: Fundamentals*, pp.95-183, Plenum Press, New York.
- [7] Urieli, I. & Berchowitz, D.M., 1984, *Stirling cycle engine analysis*, pp.5-19, Adam Hilger Ltd, Bristol.
- [8] Barron R., 1985, *Cryogenic systems*, pp.270-276, Oxford University Press, New York.
- [9] Gifford, W.E. & Longworth, R.C., "Pulse tube refrigeration," *ASME paper No.63-WA-290*, pp.17-22.
- [10] Loung, V., O'Baid, A., and Harper, S., 1997, "Path to low cost and high reliability Stirling coolers," *Cryocoolers 9*, Plenum Press, New York, pp.97-108.
- [11] Martin, J.L., Corey, J.A., and Martin, C.M., 1998, "A pulse tube cryocooler for telecommunications applications," presented at the 10th International Cryocooler Conference, Monterey, USA.
- [12] Kotsubo, V., Champagne, P., and Nast, T., 1997, "Development of a low-cost unlimited-life pulse-tube cryocooler for commercial applications," presented at the Cryogenic Engineering Conference, Portland, USA.
- [13] Guillory, E., 1994, "Designing the cryocoolers of the future," *Superconductor Industry*, Fall, pp. 16-19.

< 이상렬 위원 >