

New Cooling Techniques of High Tc Superconductor Systems

고온초전도 시스템의 새로운 냉각기술

Ho-Myung Chang

장 호 명

72-1 Sangsu-Dong, Mapo-Ku, Seoul, Korea 121-791
Department of Mechanical Engineering, Hong Ik University

서울시 마포구 상수동 72-1, 홍익대학교 기계공학과

The recent progress in new cooling techniques of the high Tc superconductor (HTS) systems is reported and discussed with some practical examples. At the beginning stage of the HTS development in research laboratories, liquid nitrogen (LN₂) is the standard medium for an effective cooling. The success of HTS in many different application areas, however, has required a variety of need in the cooling temperature and the cooling capacity with specific design restrictions. While the utilization of alternative liquid cryogenes such as liquid neon (LNe) or liquid hydrogen (LH₂) has been tried in some of them, even solid cryogenes such as solid nitrogen (SN₂) or solid hydrogen (SH₂) may be another option in special applications. The gaseous helium cooled by a cryogenic refrigerator has also been a good candidate in many cases. One of the best cooling methods for the HTS is the direct conduction-cooling by a closed-cycle refrigerator with no cryogen at all. The refrigeration may be based on Joule-Thomson, Brayton, Stirling, Gifford-McMahon, or pulse tube cycles. The pros and cons of the newly proposed cooling methods are described and some significant design issues are presented.

1. 서 론

고온초전도체가 발견된지 10여년이 지나면서, 다양한 응용분야에서 그 실용화 가능성이 서서히 증가하고 있다. 이에 따라, 그 냉각방식도 액체질소를 이용한 액체냉각 이외의 다양한 방법이 시도되고 있으며, 그 중 일부는 이미 상용화단계에 이르고 있다. 본 논문에서는 국제적 학술지나 학술회의를 통하여 이미 발표되었거나 현재 국내외에서 개발이 진행중인 여러 가지의 냉각방식을 소개하고 그 장단점들과 설계시 유의사항 등을 간단히 다루고자 한다.

일반적으로 말해서 고온초전도체의 냉각방식은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 냉열원(heat sink)의 종류에 따라서 잠열(latent heat)이용 방법과 극저온냉동기(cryogenic refrigerator)이용 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 극저온 상태의 액체나 고체가 증발되거나 용해되면서 발생하는 열을 이용하는 방법으로 액체질소를 이용한 방법이 가장 대표적이라 할 수 있다. 그러나 최근에는 액체질소 이외에 다른 액체나 고체를 이용하는 방법이 다각적으로 연구되고 있다. 반면에 밀폐사이클로 운전되는 극저온냉동기를 이용하여 냉동을 수행할 경우에는, 주기적으로 저온액체나 고체를 공급할 필요없이 전기만 공급하여 냉각이 이루어질

Table 1. Classification and characteristics of several cooling techniques for HTS

cooling source	cooling method	cooling medium	temperature	system	economy	thermal stability	cool down	ref.
latent heat	liquid cooling	nitrogen	77±5 K	simple but restricted	low investment	very good	fast	-
		neon	27±3 K					1
		hydrogen	20±3 K					2,3
	solid cooling	nitrogen	63±5 K	simple & restricted	poor but low investment	excellent	fast	4-6
		hydrogen	14±2 K					7
cryogenic refrigerator	gas cooling	helium	10 - 100 K	complex	fair and high investment	good	slow	4,9 10,13
	vapor recondensing	nitrogen	77±5 K	complex & restricted	fair and high investment	very good	fast	14
		neon	27±3 K					
		hydrogen	20±3 K					
	conduction cooling	metal	10 - 100 K	simple & flexible	cheap, but high investment	good or fair	normal	11,12 15-18

수 있다. 이 때, 냉동기는 기체나 증기와 같은 중간매체를 냉각하고 냉각된 매체가 초전도체를 냉각하는 방법이 있는가 하면, 냉동기가 금속전도체를 통하여 직접초전도체를 냉각하는 방법으로 구분할 수 있다. 이러한 냉각방법들의 분류와 특징들을 Table 1에 정리하였다.

2. 잠열(Latent Heat)이용 냉각

액체와 고체가 보유하고 있는 잠열을 이용하여 초전도체를 냉각하는 방법은 가장 일반적인 방법이다. 특히 가격과 열적 및 화학적 안정성 면에서 액체질소를 이용한 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 액체질소의 대기압 온도는 약 77.3 K 정도이며 압력변화에 따라 약 3-5 K 정도 변화가 가능하다. 그러나 이 보다 낮은 온도를 유지하기 위해서는 고체를 이용하거나 다른 액체를 사용해야 하는데, 그 중 가능한 몇 가지를 소개하고자 한다.

2-1. 액체네온 및 액체수소

질소보다 낮은 온도에서 액화되는 물질로 네온, 수소, 헬륨이 있다. 액 네온은 약 4.2 K에서 냉각되는 저온초전도시스템을 냉각하는데 적합하므로 여기에서는 제외하기로 한다. 대기압력에서

액체네온의 온도는 약 27.1 K이고 액체수소의 온도는 약 20.3 K이다. 이 온도 범위는 일반적인 고온초전도의 냉각온도보다는 약간 낮으나, 높은 자기장을 필요로 하는 경우에 적용되는 온도라 할 수 있다. 네온은 화학적으로 안정적이며 단위 체적당 증발잠열이 커서 이 온도영역에서의 좋은 냉각매체이다. 그러나 네온은 가격이 매우 비싼 기체이므로 네온을 이용한 냉각시스템을 구성할 때는 반드시 회수(recover)장치를 사용해야 할 것이다. 수소는 열전도도가 다른 물질들에 비해 월등히 크고, 우주선의 추진제나 수소자동차의 연료로 이미 대량액화되고 있는 장점이 있다. 그러나 액화과정에서 촉매를 통하여 ortho-수소를 para-수소로 변환해야 하는 어려운 점이 있고, 화학적으로 금속과의 반응성이 크며 가연성도 있어서 초전도 냉각에 많은 주의를 요한다.

2-2. 고체질소 및 고체수소

77 K과 27 K사이에서 상변화 하는 물질로 고체질소가 있다. 대기압력에서 액체질소는 약 63.1 K에서 응고가 된다. 특히, 고체질소는 약 20 K에서 63 K사이의 온도영역에서 비열이 대단히 커서 최근에 인공위성의 센서 등의 냉각에 이용되고 있고, 고온초전도체의 냉각에서도 그 가능성이 타진되고 있다. 고체질소를 이용한 냉각방법

Table 2. Classification of important cryogenic refrigerators

heat exchange	cycle type	temperature	capacity	efficiency	price
recuperative	JT (Joule-Thomson)	> 100 K	medium	low	fair
	Claude	4 - 80 K	large	high	expansive
	Brayton	20 - 100 K	large	high	expansive
regenerative	Stirling	20 - 100 K	small or medium	very high	expansive
	GM (Gifford-McMahon)	4 - 80 K	small	low	cheap
	pulse-tube	10 - 80 K	very small	very low	fair

의 가장 큰 장점으로서는 고자장용 전기시스템에 대한 열적 안정성을 들 수 있다. 외부적인 열적 교란이 있거나 지속적인 냉각의 중단의 경우에도 고체질소의 큰 열용량을 이용하여 온도의 변화를 제한하고 한류기의 작동이 가능하게 하는 등 우수한 안정성이 기대되고 있다.

액체수소는 대기압력에서 약 13.9 K에서 고체가 된다. 고체와 액체의 혼합상태의 수소(slurry hydrogen)는 높은 밀도의 수소저장을 위해 우주선의 연료에 이미 사용되고 있다. 이 온도영역의 냉각이 고온초전도 시스템이 있다면, 고체수소를 이용한 방법도 가능하기는 하나, 앞서 기술한 수소의 특성에 주의하여야 할 것이다.

3. 냉동기(Refrigerator) 냉각

극저온용 냉동기에 의하여 초전도시스템을 냉각하는 방법은 앞절에서 기술한 상변화물질의 잠열을 이용하는 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 우선 주기적으로 액체나 고체를 공급할 필요없이 전기만 공급하여 시스템을 작동하므로 운전이 매우 용이하다고 할 수 있다. 그리고 필요한 곳에 필요한 양만큼 냉동을 수행하므로, 저장(storage)이나 이송(transfer)에 의한 열손실을 줄여 운전이 경제적이다 할 수 있다. 또 냉동기는 그 작동온도가 고온초전도체의 온도 전체인 20 K에서 100 K까지를 포함하는 장점도 가지고 있다. 반면에 냉동기에 대한 초기투자가 필요하므로, 실제 냉각방법의 선택은 그 운전비와 투자비를 포함한 경제성을 검토한 후 결정해야 한다.

현재 상용화되어 있는 대표적인 극저온용 냉동기의 종류를 Table 2에 정리하였다. 밀폐사이클로

운전되는 냉동기는 고압기체와 저압기체사이의 열교환방식에 따라 열교환형(recuperative)과 열재생형(regenerative)로 구분한다. 열교환형은 두 유체가 서로 다른 공간을 마주보고 흐르며 에너지를 교환하는 방식이며, 열재생형은 고압유체와 저압유체가 축방향으로 온도구배가 존재하는 공간을 주기적으로 왕복유동하면서 축열 및 방열하는 방식이다. 일반적으로 열교환형이 대형에, 열재생형이 소형에 각각 적합하다고 할 수 있고, 열교환형은 불순물의 축적으로 냉매의 유로가 막혀 장기운전이 어려운 단점이 있고, 열재생형은 왕복운동에 의한 소음 및 진동이 발행하는 단점이 있다. 실제로 현재까지 가장 많이 사용되는 중소형 냉동기는 GM (Gifford-McMahon)사이클형이다.

3-1. 기체냉각 및 증기재응축 냉각

초전도체의 냉각부하를 냉동기에 전달하는 공간매체로 기체로 사용하는 방법이 기체냉각방식이다. Fig. 1은 실제로 제작된 실험용 고온초전도를 도식적으로 나타내고 있다. 상은 자기장공간을 형성하기 위해 교류용 Bi-2212 초전도자석을 중앙상부에 위치하고 있고, 자석을 포함한 내부용기(innermost vessel)공간에 기체헬륨이 충전되어 있으며, 이 용기를 GM냉동기가 냉각하고 있다. 시스템은 진공용기와 복사설프로 단열되어 있으며, 벌크형 Bi-2223와 구리로 전류도입선(current lead)을 이용하고 있다. 이 시스템은 지름 45 mm의 공간에 1 T의 자장을 형성하며, 냉동부하는 20 K에서 8 W이하로 보고되었다. 또 이와 다른 경우에는, 냉동기로 냉각된 기체헬륨이 관을 통하여 순환하면서 초전도체를 냉각하는

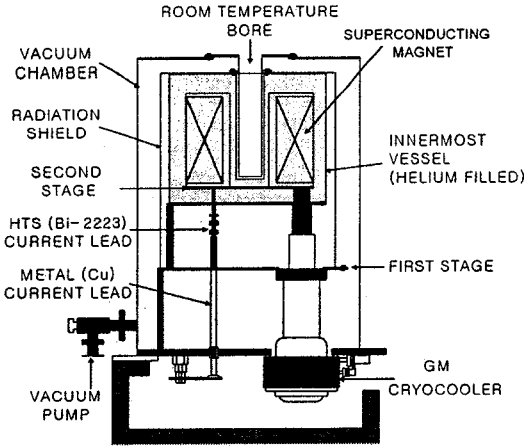


Fig. 1. Gas-cooled HTS magnet system

경우도 있다. 이러한 방식은 앞서 설명한 바와 같이 넓은 온도범위에 작동할 수 있는 장점이 있으나, 시스템이 약간 복잡하고, 초기에 냉각시간이 오래 소요되는 단점이 있다.

초전도시스템을 액체냉각하는데, 열부하에 의하여 증발된 증기를 외부로 배출하는 대신, 냉동기에 의하여 다시 액체로 응축시키는 방식을 증기 재응축(vapor recondensing)냉각이라 한다. 이 방식은 액체냉각과 냉동기냉각의 장점을 동시에 갖고 있으며, 저온초전도 MRI시스템 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법의 단점으로 시스템 구성이 복잡하고 제한적이라는 점과, 정상상태의 운전을 위해서는 적절한 액체량과 압력의 계측과 제어를 반드시 수행해야 하는 점 등을 들 수 있다.

3-2. 전도 냉각

중간 냉각매체를 사용하지 않고, 금속의 전도를 통하여 초전도체를 직접 냉각하는 방식은 여러 가지의 장점을 갖고 있다. 기체냉각방식과 같이 넓은 온도범위에 운전이 가능하고, 운전경비도 저렴하며, 시스템의 구성이 간단하면서 매우 유연하다고 할 수 있다. 특히 전도 냉각방식에는 유체의 유동이 없으므로 증력에 무관하게 냉동기와 초전도체를 위치할 수 있고 매우 밀집된 소형으로도 제작할 수 있다.

Fig. 2는 냉동기로 전도냉각되는 심전도용 SQUID의 구성을 나타내고 있다. 소형이며 고효율인 Stirling냉동기가 긴 전도체 및 전류도입선

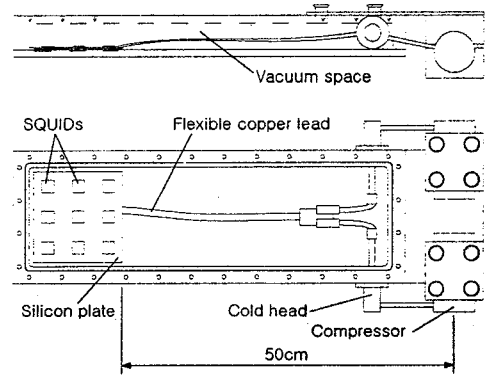


Fig. 2. Conduction-cooled HTS SQUIDs for heart scanning

을 통하여 25개의 SQUID를 냉각하는데, 냉동기 내에서 왕복운동하는 피스톤에 의한 진동과 자장 간섭을 최소화하도록 약 50 cm의 거리에 냉동기가 위치하고 있다. 이 시스템의 온도는 60 K이며 SQUID 한 개의 냉동부하는 약 0.9 W로 보고되었다. 냉동기로 전도냉각되는 초전도시스템의 예는 그 밖에도 매우 많이 찾아 볼 수 있다. 고온초전도 MRI 시스템, 비파괴 검사용 SQUID, 자기 분리용 자석, 인공위성 통신장비의 냉각, 고온초전도 모터 등이 대표적이다.

반면에 냉동기 전도냉각 방식에서는 해결해야 할 기술적인 문제도 있다. 첫째로, 외부 교란에 대해 열적 안정성을 확보하기 위한 방법이 필요하고, 둘째로 냉각시간을 단축시키기 위한 열 스위치(thermal switch)의 개발도 필요하며, 셋째로 고자장의 경우 전류도입선의 전도냉각에 대한 연구도 함께 진행되어야 한다.

4. 결 어

다양한 분야에 응용에 적용되는 고온초전도 시스템은 다양한 조건의 냉각방법을 요구한다. 연구개발을 위한 실험용에서 산업용 응용기기에 이르기 까지 적절한 냉각기술은 경제적으로도 매우 중요하며, 동시에 초전도기술의 실용화에 결정적인 역할을 할 수도 있다. 새로이 시도되거나 개발 중인 여러 냉각기술들에 대한 정보가 여러 회원들의 연구에 유용하게 사용될 수 있기를 진심으로 바라며 글을 맺는다.

참고문헌

- [1] R.N. Richardson and A.C.R. Tavner, *Cryogenics*, 35, 195 (1995)
- [2] W.H. Denton and C.M. Nicholls, "Technology and Uses of Liquid Hydrogen," Pergamon Press, London, pp.79-105, 1964
- [3] D.E. Dancy, V.D. Arp and R.O. Voth, *Adv. Cryogenic Eng.*, 35, 1767 (1990).
- [4] Y. Iwasa, "Research Proposal for the U.S./Korea Collaborative R&D Program on High-Temperature Superconducting Devices: Bulk Materials and Innovative Cryogenic Technique," U.S. NSF, 1999.
- [5] C.D. Miller, *Adv. Cryogenic Eng.*, 43, 927 (1998).
- [6] R.L. Oonk, *Adv. Cryogenic Eng.*, 37, 1385 (1992).
- [7] G.L. Mills et al., *Adv. Cryogenic Eng.*, 41, 1121 (1996).
- [8] R.H. Gross et al., "Versatile Cooling for HTS Applications," *Superconductor Industry*, Fall, pp.20-23, 1994
- [9] 장호명, *공기조화·냉동공학*, 25, 75 (1996)
- [10] 백종훈, 이훈, 김영권, 장호명, 홍계원, 이호진, *공기조화·냉동공학회 1995년도 동계학술대회 논문집*, pp.370-377, 1995.
- [11] M.A. Daugherty et al., *Adv. Cryogenic Eng.*, 43, 165 (1998).
- [12] B.X. Zhang et al., *Cryocoolers*, 9, 943 (1997).
- [13] T. Hase et al., *Cryogenics*, 36, 971 (1996).
- [14] R.A. Ackermann et al., "Advanced Cryocooler Cooling for MRI Systems," 10th Int. Cryocooler Conf., Monterey, CA, U.S.A., 1998.
- [15] 장호명, '99년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, i (1999).
- [16] R. Hohmann et al., *Cryocoolers*, 9, 925 (1997).
- [17] V. Kotsubo et al., "Development of Pulse Tube Cryocoolers for HTS Satellite Communications, 10th Int. Cryocooler Conf., Monterey, CA, U.S.A., 1998.
- [18] C.J.H.A. Bolm et al., "Construction and Tests of a High-Tc SQUID-Based Heart Scanner Cooled by Small Stirling Cryocoolers," 10th Int. Cryocooler Conf., Monterey, CA, U.S.A., 1998.