

## 액체를 사용하지 않는 초전도시스템의 개발 동향

장 호 명  
홍익대학교 기계공학과

### Current Status of Liquid-Free Superconducting System Develop

Ho-Myung Chang  
Hong Ik University, Department of Mechanical Engineering

mchang@wow.hongik.ac.kr

**Abstract** The recent progress in the new cooling technology for superconducting systems without liquid cryogens is briefly presented. In these conduction-cooled systems, the superconducting magnets are cooled by a direct contact with closed-cycle cryocoolers and only electricity is supplied to maintain the cryogenic temperatures. It is reported that at least 20 conduction-cooled (low  $T_c$  or high  $T_c$ ) superconducting systems have been constructed, tested, or commercially used worldwide. Some of the significant design issues are discussed in comparison with the conventional liquid-helium cooled systems.

### 1. 서 론

지난 30-40여년간 개발되어 사용되고 있는 수많은 초전도시스템들은 대부분 액체헬륨의 증발잠열을 이용하여 냉각되고 있다. 액체헬륨은 대기압에서의 끓는 온도가 4.2 K이며, 압력을 0.1기압과 2기압사이로 변화시킬 때, 약 2.5 K에서 5 K의 온도범위에서 안정적으로 극저온을 유지하는데 사용할 수 있다. 헬륨은 보통 왕복동팽창기를 사용하는 대형 Collins액화기로 액화하여 주기적으로 초전도시스템에 공급된다.

1990년, 극저온 냉동기술에는 중요한 발전이 시작된다. 소형 극저온냉동기의 대명사라고 할 수 있는 GM(Gifford-McMahon)냉동기의 최저도달온도는 보통 약 10 K에 불과 하였는데, 그 이유는 모든 열재생물질의 비열이 20 K이하에서 급격히 감소하여 열재생의 효과가 없어지기 때문이었다. 그런데 일본의 한 연구팀은 희토류(rare earth)의 물질중 5-10 K 영역에서 비열이 매우 큰 물질을 발견하게 되었다. 이들을 GM냉동기의 열재생물질로 사용하면서 부터, 소형냉동기로 액체헬륨온도인 4 K에 도달할 수 있게 된 것이다. 그 후 극저온 열재생에 관한 많은 연구개발이 진행되었고, 현재 판매되는 대부분의 GM냉동기들은 4 K에서 10,000시간 이상 연속운전이

가능한 것으로 보고되고 있다.

밀폐사이클로 운전되면서 4 K를 유지할 수 있는 GM냉동기의 개발은 액체헬륨을 사용하지 않고 전기만을 이용하여 냉동기로 전도냉각되는(conduction-cooled) 초전도 시스템의 출현을 현실로 만들었다. 1994년에 처음으로 냉동기 전도냉각방식의 실험용 초전도시스템이 선을 보인 후, 현재까지 MRI, 지하탐사, 열처리, 자기분리(magnetic separation) 등 여러 분야에 사용될 액체없는 초전도시스템이 개발되고 있다.

특히 1990년대 초반부터 가속화되고 있는 고온초전도체의 연구개발은 이러한 냉동기 전도냉각방식의 가능성을 한층 더 높였다고 할 수 있다. 초전도 임계온도가 100 K이상인 재료가 개발되면서, 상온의 전원에서 극저온의 초전도시스템에 전류를 공급하는 전류도입선(current lead)의 재료로 사용되기 시작한 것이다. 산화물인 고온초전도체는 열전도도가 매우 작기 때문에 기존의 금속 전류도입선에 비해 냉각부하를 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라, 헬륨을 사용하지 않고도 초전도상태를 유지할 수 있게 된 것이다.

본 원고에서는 현재까지 학술대회나 학술지를 통하여 공개된 전도냉각방식의 초전도시스템의 사례를 폭넓게 조사하여 정리를 시도하였다. 그리고 이 자료들을 바탕으로 기존의 액체냉각방식과 다른 특징을 비교분석하고, 설계 및 제작에 관한 중요 현안을 제시하고자 한다.

### 2. 시스템 특징

저온액체를 사용하지 않고 냉동기로 직접 전도냉각되는 초전도시스템은 액체냉각방식의 시스템과 다른 여러 가지의 특징들을 가지고 있다. 이 특징들은 Table 1에 간단히 열거하였으며 그 중 중요한 몇 가지 사항을 현재 세계적인 연구개발 현황과 함께 언급하고자 한다.

첫째로, 전도냉각방식의 가장 큰 장점으로서는 시스템 구성에서의 유연성(flexibility)을 들 수 있다. 액체냉각 방식의 시스템에서는 액체를 저장하기 위한 저온조를 필요로 하므로 저온조에 대한 진공단열공간으로 인해 시스템 구성이 매우 제한적이라 할 수 있다. 또한 증기에 비해 밀도

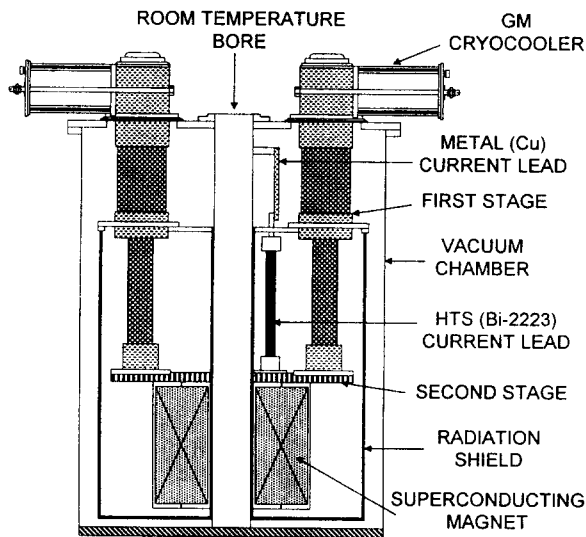
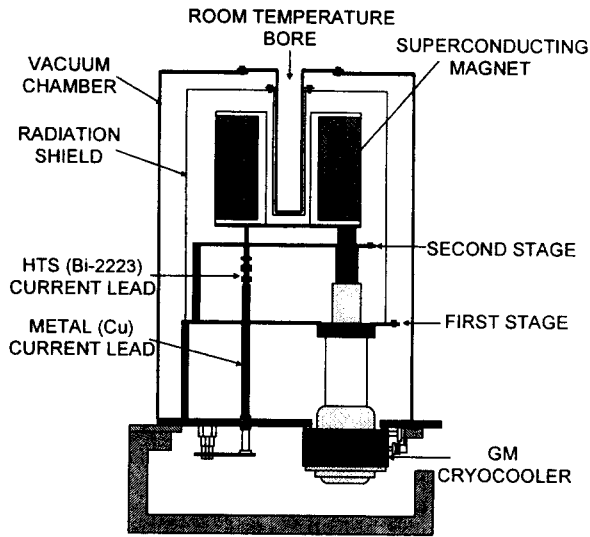


Fig. 1 Two Examples of Typical Superconducting Systems Conduction-Cooled by Cryocoolers

가 큰 액체는 중력장하에서 항상 하부에 위치해야 하며 증발되는 증기의 공간적인 열적 안정성도 항상 고려해야만 한다. 따라서 시스템의 상부가 실온과 접하고 그 하부에 저온의 초전도부품이 위치하는 것이 전형적인 액체냉각 시스템의 구성이었다. 그러나 전도냉각의 경우에는 액체를 사용하지 않고, 금속을 통한 전도로 극저온냉동기에 열이 전달되므로 중력장에 전혀 무관하게 시스템을 구성할 수 있다. Fig. 1은 전도냉각되는 초전도시스템의 전형적인 두 가지의 예를 나타내고 있다. 냉동기가 하부에서 냉각을 수행할 수도 있고, 상부에 위치하여도 무방하다. 또 필요에 따라서는 수평으로 혹은 임의의 각도로 부착하는 구성도 가능하다. 동시에 초전도자석과 냉동기가 상당한 거리에 위치할 수도 있고, 진공 단열공간의 크기와 형태에 있어서도 매우 유연한 구성을 할 수 있다.

Table 1 Characteristics of Liquid-Cooled and Conduction-Cooled Superconducting Systems

	Liquid-Cooling	Conduction-Cooling
Cooling Medium	Liquid He Liquid Ne Liquid N <sub>2</sub>	None
Cooling Temperature	4.2±1 K 27±3 K 77±5 K	3 - 150 K
System Configuration	Complexed & Restricted	Simple & Flexible
Energy Consumption	Fair	Small
Capital Investment	Fair	Expensive
Thermal Stability	Excellent	Fair
Cooldown Time	Short	Long
Cooling of Current Lead	Easy	Difficult

전도냉각방식의 두 번째 장점으로 냉동온도의 범위가 매우 폭넓다는 점을 들 수 있다. Table 1에 나타난 바와 같이, 초전도시스템에 사용이 가능한 저온액체로는 액체헬륨, 액체네온, 액체 질소등이 있는데, 이들은 대기압에서의 끓는 온도 전후에서만 냉각이 가능하다. 냉동기로 전도 냉각되는 경우에는 냉동사이클의 종류 및 냉동용량에 따라 매우 넓은 온도에서의 냉동이 가능한 장점이 있다. 특히 현재 개발이 진행중인 고온초전도 시스템의 냉각의 경우에 이 냉동온도 선택의 폭은 매우 넓다고 할 수 있다.

세 번째로 경제성 면에서의 장점을 지적할 수 있다. 저온액체는 수송과 저장과정에서 열유입에 의한 손실을 동반하게 된다. 또 증발되는 기체 (boil-off gas)가 상당히 낮은 온도로 대기로 배출될 때 상당한 량의 열역학적 가용성의 손실을 가져온다. 냉동기 전도냉각의 경우에는 냉동이 필요한 위치와 시점에서 냉각을 수행하므로 이러한 손실을 최소화 할 수 있으면 운전에 있어서 매우 경제적이다 할 수 있다. 또한 액체저장을 위한 저온조의 경우에는 액체의 공급과 기체의 배출을 위한 벽이 존재하므로, 실온에서 저온으로의 열전도가 상당히 존재하나 냉동기 전도냉각 방식에서는 이러한 벽을 제거할 수 있다. 특별히 에너지 분야에서 사용되는 초전도시스템의 경우에 이 경제성은 더욱 중요한 역할을 하게 될 것이다. 반면에 시스템의 제작면에서는 냉동기의 가격으로 인한 다소의 초기투자비 지출을 고려해야 한다.

전도냉각방식의 이러한 장점들에 비해, 기술적으로 해결해야 할 어려운 점도 동시에 존재한다. 그 첫번째로 초전도시스템의 열적 안정성

Table 2 List of Developed Superconducting Systems Conduction-Cooled by Cryocoolers

Institute/ Manufacturer	Purpose	Magnetic Field	Magnet Materials	Dimensions		Operating Temperature	Cryo- cooler	Ref.
				ID (cm)	Length (cm)			
General Electric	MRI	0.5 T	Nb <sub>3</sub> Sn	56	44	10 K	GM	[2]
		0.5 T	NbTi	27	80	4.2 K	GM	[10]
U.S. Navy	Minesweeping	4.85 T	NbTi	148	44	5 K	GM	[3]
Toshiba	Research Magnetic Separation Single Crystal Growth	10 T	NbTi	17	24	4 K	GM	[1] [4]
			Nb <sub>3</sub> Sn	9	13			
		6 T	NbTi	22	35	4 K	GM	
		4 T	NbTi	45	27	4 K	GM	
		0.31 T	Nb <sub>3</sub> Sn	29	6	4 K	GM	
Los Alamos	Magnetic Separation	1.6 T	-	-	-	30 K	GM	[5]
Sumitomo Heavy Industry	Heat Treatment Electrochemical Reaction X-Ray Diffraction	4 T	Nb <sub>3</sub> Sn	6	20	11 K	GM	[6] [14]
		11 T	Nb <sub>3</sub> Sn	9	22	4.8 K	GM	
			Nb <sub>3</sub> Sn	19	22			
		6 T	NbTi	26	33	5 K	GM	
		5 T	NbTi	8	14	5.2 K	GM	
		10 T	Nb <sub>3</sub> Sn	13	23	4 K	GM	
NbTi	25		23					
Kobe Steel	-	5 T	NbTi	30	-	4 K	GM	[7]
		10 T	NbTi	10	-	4 K	GM	[13]
			Nb <sub>3</sub> Sn					
Lockheed Martin	HTS Microwave Circuit	-	-	-	-	77 K	Pulse Tube	[8]
Univ. of Twente	HTS SQUID Heart Scanning	-	-	-	-	60 K	Stirling	[11]
Ins. fur Schicht und Ionentechnik	HTS SQUID Non-Destructive Evaluation	-	-	-	-	77 K	JT	[9]
Reliant Electric	HTS Motor	-	-	-	-	30 K	Brayton	[12]

(thermal stability)을 지적할 수 있다. 전기의 공급중단으로 인해 냉동기가 냉동을 수행할 수 없게 되는 경우라든가, 여러 가지의 이유로 초전도체에 열적 교란이 발생하였을 때에 대비한 방안이 필요하다. 최근의 연구결과에 의하면, 고온 초전도 시스템의 경우에는, 운전온도가 상대적으로 높아서 초전도체 및 상전도체의 비열이 상당히 크므로 열적 안정성에 큰 문제는 없는 것으로 보고되고 있다. 그러나 액체냉각 방식에 준하는 정도의 열적 안정성의 확보를 위해서는, 한류기와 같은 기기의 적용, 그리고 정확한 안정적 해석을 통한 기술의 개선이 필수적이라고 할 수 있다.

전도냉각방식의 두 번째 단점으로 긴 냉각시간을 들 수 있다. 상온에서 운전을 시작하는 냉동기는 보통 무부하상태에서 저온에 도달하는데 약 1-2시간 정도가 소요되나, 실제 시스템을 구성하였을 때에는 10-20시간 이상 소요되기도 한다. 최근에는 2단냉동기에 의한 냉각시간을 단축시키기 위한 여러 가지 원리의 열스위치(thermal switch)의 개발을 시도하고 있다. 열스witch는 작동초기에 제1단의 큰 열용량을 이용하여 저온부를 냉각하고, 일정한 온도이하에서는 열을 차단하여 냉각시간을 단축하는 역할을 한다. 냉각시

간의 단축은 실험용이나 연구용 시스템의 경우에 특히 중요하다고 할 수 있다.

전도냉각방식의 실용화를 위해 해결해야 하는 또 하나의 중요한 기술중 하나가 전류도입선의 냉각이다. 액체냉각방식에서 전류도입선은 증발되어 배출되는 기체가 전류도입선을 따라가며 냉각하는 증기냉각(vapor-cooled)이 표준화되어 있다. 그러나 전도냉각방식에서는 전류도입선이 진공공간에 위치해야 하며 그 냉각방식도 전도로 이루어져야 한다. 이 냉각방식은 이미 실용화 단계에 있는 벌크형 고온초전도 전류도입선의 설계 및 제작기술과 함께 전도냉각에 대한 연구가 진행 중에 있다.

### 3. 개발사례

역사적으로 볼 때, 최초로 냉동기로 전도냉각되는 초전도시스템이 개발된 것은 1994년으로 일본 Toshiba사에 의한 것으로 알려져 있다. Table 2는 그 후 현재까지 약 4-5년간 개발된 시스템에 관한 주요 사항을 열거하고 있다. 이들은 모두 개발이 완료되었다고 보고된 것이며, 현재 개발이 진행중인 시스템을 포함하면, 실제로 이 보다 더 많은 사례가 있을 것으로 생각된다.

국가별로 보면 일본이 가장 많은 시스템을 개발하였다고 볼 수 있고, 다음이 미국이며 일부 유럽국가들이 포함되어 있다. 일본에서는 모두 기업이 개발을 주도하였으며, 주로 자기분리나 재료의 연구개발을 위한 시제품으로 개발되었다. 이들 대부분의 크기는 지름이 1-2 cm 정도인 소형이며 자기장의 크기가 5-10 T 정도이다. 냉동온도는 NbTi코일의 경우 4-5 K이고 Nb<sub>3</sub>Sn코일의 경우 10-11 K로 모두 2단형 GM냉동기로 냉각된다. 이 시스템들에 사용된 전류도입선의 재료는 벌크형 Bi-2223와 구리를 사용한 이중도입선으로 보고되어 있다.

현재 개발된 전도냉각에 의한 초전도 시스템 중에서 가장 큰 시스템은 미국 해군연구소(Naval Surface Warfare Center)에 의한 것이다. 해저탐사를 위한 ALISS(advanced lightweight influence sweep system)라는 프로그램의 일환으로 개발되었는데, 지름 약 1.5 m, 최고 자기장 4.85 T인 Cu-NbTi(4:1)코일을 약 5 K로 냉각하기 위해 두 개의 GM냉동기를 사용하였다. 냉각시간 단축을 위해 산소와 에탄올을 이용한 열스위치를 장착하였고 YBCO로 전류도입선을 제작하였다.

상업적으로 생산된 전도냉각 초전도시스템으로는 의료용 MRI(magnetic resonance imaging)시스템이 있다. 미국의 General Electric사는 0.5 T급인 Nb<sub>3</sub>Sn 시스템을 Boston의 Brigham & Women's 병원에 납품하였고, 최근에는 두뇌촬영 전용의 소형 NbTi시스템을 개발하였다.

고온초전도 시스템의 개발이 본격화되면서 전도냉각방식에 관한 연구도 활발히 진행 중이다. 그 중에서도 가장 대표적인 사례로는 미국 Los Alamos국립연구소 주관의 산학연 공동과제인 자기분리시스템 개발이다. 기존의 저항식 분리시스템보다 전기에너지 소비를 90%이상 절약할 수 있다고 예상하고 있다. 그리고 고온초전도 고주파회로나 SQUID와 같은 전자분야에 대한 전도냉각에 대한 응용도 본격적으로 진행 중에 있다. 이 경우 냉동용량은 작고 냉동온도가 상당히 높으며 냉동기의 기계적 운동에 의한 자기간섭이 작아야 하는 점 때문에 GM냉동기가 아닌 여러 사이클의 극저온냉동기의 응용이 시도되고 있다.

#### 4. 결 어

액체를 사용하지 않는 초전도시스템의 개발은 마치 아이스박스를 대체하는 전기냉장고의 개발에 비유할 수 있다. 현재까지 개발된 사례들은 상대적으로 소형 시스템에 국한되어 있고 아직 기술적으로 초보단계에 있다고 할 수 있다. 그러나 향후 이 분야는 앞서 기술한 장점들 때문에, 초전도산업의 실용화를 앞당길 수 있는 결정적 역할을 할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 국내에서도 이 분야 연구개발에 여러 회원들의 많은 관심과 참여가 있기를 진심으로 바란다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Urata, M., "Superconducting Magnet without Refrigerant," (in Japanese) J. IEE Japan, Vol.114, No.12, pp.817-821, 1994
- [2] Van Oort, J.M. et al., "A Cryogen-Free 0.5 Tesla MRI Magnet for Head Imaging," Adv. Cryogenic Eng., Vol.43A, pp.139-147, 1998
- [3] Heiberger, M., "Design, Fabrication, and Testing of the ALISS Superconducting Mine-Countermeasures Magnet," Adv. Cryogenic Eng., Vol.43A, pp.149-156, 1998
- [4] Kobayashi, T. et al., "Manufacturing of Liquid Helium Free Superconducting Magnets for Industrial Use," Adv. Cryogenic Eng., Vol. 43A, pp.157-163, 1998
- [5] Daugherty, M.A. et al., "Ramp Rate Testing of an HTS High Gradient Magnetic Separation Magnet," Adv. Cryogenic Eng., Vol. 43A, pp.165-171, 1998
- [6] Hasebe, T. et al., "Cryocooler Cooled Superconducting Magnets and Their Applications", Adv. Cryogenic Eng., Vol.43A, pp.291-297, 1998
- [7] Shibutani, K. et al., "Development of Two Types of Cryogen Free Superconducting Magnets," Adv. Cryogenic Eng., Vol.43A, pp.299-305, 1998
- [8] Hohmann, R. et al., "Integration of HTS SQUIDs with Portable Cooling Devices for the Detection of Materials Defects in Non-Destructive Evaluation," Cryocoolers, Vol.9, pp. 925-934, 1997
- [9] Kotsubo, V. et al., "Development of Pulse Tube Cryocoolers for HTS Satellite Communications, 10th Int. Cryocooler Conf., Monterey, CA, U.S.A., 1998
- [10] Ackermann, R.A. et al., "Advanced Cryocooler Cooling for MRI Systems," 10th Int. Cryocooler Conf., Monterey, CA, U.S.A., 1998
- [11] Bolm, C.J.H.A. 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
- [12] Zhang, B.X. et al., "Cryocooler Integration with High Temperature Superconducting Motors," Cryocoolers, Vol.9, pp. 943-948, 1997
- [13] Hase, T. et al., "Generation of 1 T, 0.5 Hz alternating magnetic field in room temperature bore of cryocooler-cooled Bi-2212 superconducting magnet," Cryogenics, Vol.36, No.12, pp.971-977, 1996
- [14] Watanabe, K. et al., "11 T liquid helium-free superconducting magnets," Cryogenics, Vol.36, No.12, pp.1019-1025, 1996