

## 극저온의 생성 및 dc SQUID개발

### Generation of Very Low Temperature and Development of dc SQUID

박      중      철\*  
Jong Chul   Park

#### 초              록

액체헬륨온도(4.2K)를 얻을 수 있는 극저온 소형 냉동기 개발과 정밀측정(전류, 자장, 전압 등)에 사용되고 있는 dc SQUID(초전도 양자간섭장치) 제작에 관하여 설명하였다. 이와 아울러 극저온 연구가 첨단과학 및 산업에 어떻게 응용하고 있는가와 국내외 연구현황에 대하여 간단히 기술하였으며 앞으로의 대책에 관하여 논의한다.

#### 1. 서      론

1908년 네덜란드의 물리학자 캐머린 온네스<sup>1)</sup>에 의하여 지구상에 존재하는 물질 중에서 가장 낮은 온도까지 기체로 존재하던 헬륨이 액화됨에 따라 본격적인 극저온의 연구가 시작되었다. 그후 초전도체를 비롯하여 여러가지 흥미로운 과학적인 발견이 극저온 영역에서 이루어졌으나, 오랫동안 대학의 실험실을 벗어나지 못하는 상황이었다.

1950년대 말에 이르러 우주개발 경쟁이 선진국간에 시작되면서 극저온 기술은 빠른 속도로 발전되어 이제는 연구개발 단계에서 실용화로 나아가는 단계이며 여러 분야에서 응용이 되고 있고, 미래의 산업발전에 없어서는 안될 첨단기술 중 하나이다.

극저온 기술은 극저온 환경을 만드는 생성 기술과 초전도체로 대표되는 응용기술 그리고 진단기술로 나눌 수 있다(Fig.1 참조). 생성

기술에는 범용의 소형냉동기와 액화기가 있으며 특수한 목적으로 mK 영역까지 내릴 수 있는 냉동기가 있다.

극저온 응용은 사실상 초전도체의 응용과 동의어로 사용될 정도로 초전도체가 주류를 이루고 있다. 초전도체의 응용은 다시 초전도자석을 제작하여 이용하는 대규모 응용과 조셉슨 효과를 주로 이용하는 저온 전자공학으로 나뉘어진다.

극저온 기술을 개발하는데는 우주산업이나 원자력 기술과 마찬가지로 많은 연구비와 기술축적이 요구되므로 미국, 일본 등 몇몇 선진국에 의해서 독점되어 왔으며, 전략적인 중요성과 대규모 투자가 필요하므로 국가적 차원의 연구개발이 이루어져 왔다. 따라서 다른 나라에 기술 이전을 기피하고 있는 실정이다.

이 논문에서는 극저온 기술에 대한 국내외 현황을 간단히 살펴보고 현재 특정과제로 수행중인 극저온 기술개발 과제를 중점적으로 설

\* 한국표준연구소, 양자연구부장

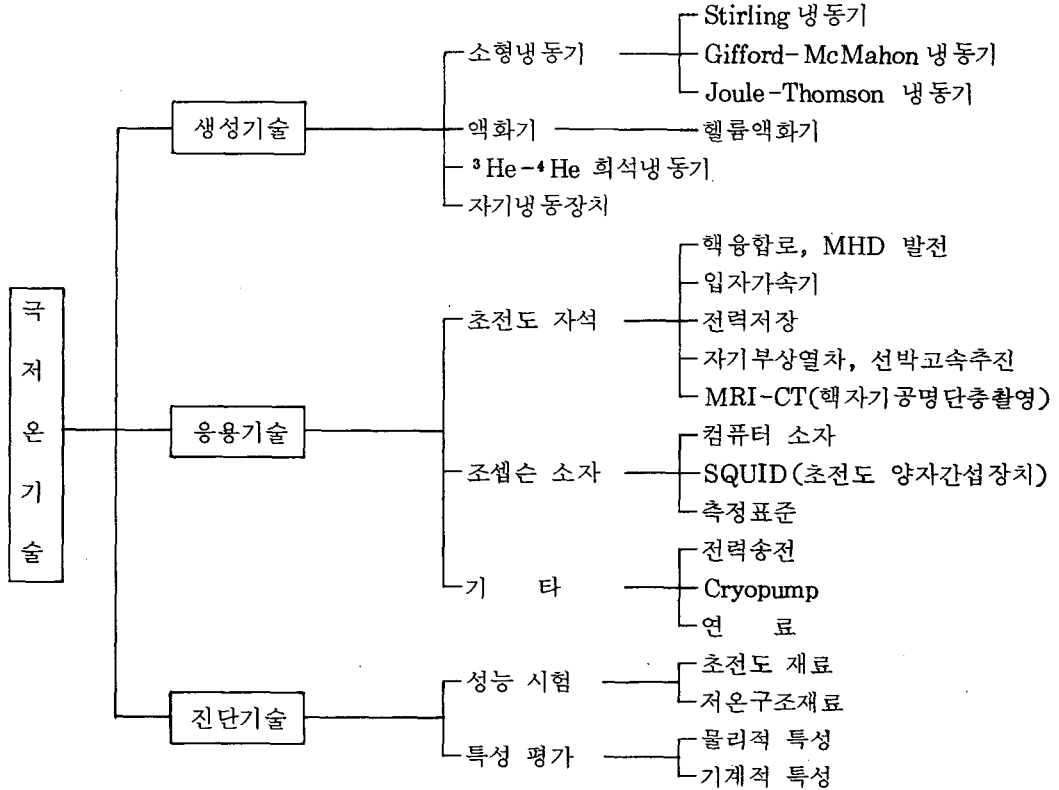


Fig.1 Technology Tree of Ultra-low Temperature

명하고자 한다.

## 2. 국내·외 연구현황

### 국내현황

극저온 연구를 위해서는 액체헬륨 온도에 도달하는 것이 전제조건이다. 1982년말에 한국표준연구소에 헬륨액화기가 도입된 이래 1984년에 서울공대, 1988년에 포항공대에 헬륨액화기가 도입되어 가동되고 있으며 10K까지 내릴 수 있는 closed cycle cryocooler가 20여대 도입되어 주로 대학의 실험실에서 물성측정에 사용되고 있다(극저온 냉동기 개발, 김영인 등 참조). 그간 한국표준연구소에서는 저온표준, 조셉슨 소자를 이용한 전압표준, 조셉슨 효과 등을 연구하고 있으며,<sup>2,3)</sup> 서울공대 전기공학 과에서는 1984년 이래로 초전도 전력에너지 저장장치(SMES)를 연구하고 있다.<sup>4)</sup>

이 밖에 포항공대에서 조셉슨 효과를 비롯한 저온물리학 연구를 시작하는 단계이며 한국전기연구소에서는 SMES 제작을 위한 기초 연구를 수행중이다. 극저온과 관련된 산업계의 활동은 거의 전무한 상태이며 금성전선연구소에서 Nb-Ti 초전도선을 제작한 것이 유일한 예라 하겠다.

극저온 냉동기 개발이나 본격적인 저온응용 연구는 아직 수행된 바 없다.

### 외국의 현황

1960년대 이래로 헬륨액화기가 상업화되었으며 우주산업, 입자가속기 등에서 필요로 하는 대량의 액체헬륨을 공급할 수 있는 시설이 되어 있고 소형냉각기 기술은 미국, 영국, 일본, 스웨덴 등에 의해 독점되어 있다.

대규모 응용의 대표적인 예인 초전도 자석의 개발도 이미 상업화 단계에 있어서 MRI-

CT용 초전도 자석(~2T)과, 입자가속기에 사용되는 고자장의 초전도자석을 대량 생산하는 것이 가능하다. SSC(Superconducting Super-Collider)의 경우에는 10억불이 넘는 예산으로 10,000여개의 초전도 자석을 제작할 계획으로 있다.

조셉슨 컴퓨터 개발을 위한 연구는 IBM에 의해서 오랫동안 추진되어 오다가 1983년에 중단되었지만 일본에서는 ETL과 Fujitsu 등에서 계속되고 있다. 미국의 Hypres사는 조셉슨 소자를 사용한 초고속 oscilloscope를 개발하여 시판하고 있다.

일본에서는 1982년부터 5년간에 걸쳐 과기청 주관으로 초전도·극저온·기반기술 연구를 수행하였다. 금속재료연구소, 전자기술종합연구소(ETL), 그리고 산업체가 참여하여 초전도 재료의 제조 및 평가기술, 극저온 냉동, 냉각기(극저온 소형냉동장치, 자기냉동장치) 개발, 그리고 극저온 응용에 관한 사전연구도 수행하였다. 이 밖에 초전도 자기 부상열차를 개발하여 시운전에 성공한 단계이다.

3. 극저온 소형냉동기

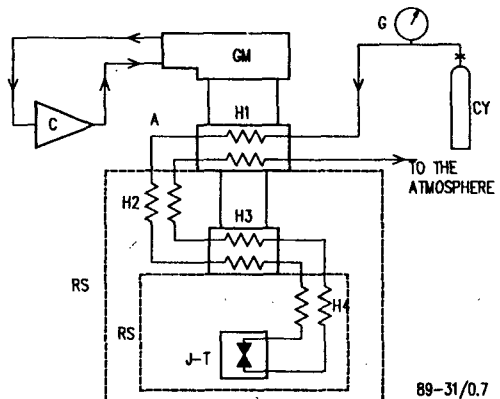
극저온을 얻는데 사용되는 냉동기(cryocooler)는 냉각방법, 온도영역, 냉각용량 등에 따라 여러가지로 분류할 수 있다. 냉각방법에는 대표적인 것으로 Stirling 냉동기, Gifford-McMahon(G-M) 냉동기, Joule-Thomson(J-T) 냉동기 등이 있으며 이것에 대하여는 본 심포지움의 다른 논문에서 자세히 설명될 것이다. 본 연구에서는 온도영역에 있어서 대략 10K 이하, 냉각용량(cooling capacity)이 1~10W 정도인 실험실용 소형냉동기로 뒤에서 설명할 SQUID를 냉각시키는데 사용할 수 있는 것이 관심 대상이다.

냉각기의 개발은 오랜 역사를 가지고 있어서 1815년 스코틀랜드의 목사인 Robert Stirling에 의해서 Stirling 엔진이 고안되고 1861년에는 냉동기로 이용되기에 이르렀다. 그 후 1946년에 미국 MIT 교수인 Collins

에 의해서 헬륨액화기가 개발되어 상용화되고 70년대에 들어오면서 군사적 목적으로 소형 냉각기가 필요함에 따라 10K까지 내릴 수 있는 Stirling 냉각기가 개발되었다. 70년대에는 내구성이 뛰어난 Gifford-McMahon 냉각기가 개발되어 미국의 Cryogenic Technology Inc.(CTI)와 Air Products and Chemical Inc에 의해 생산되므로써 대학 및 연구소의 실험실에서 널리 사용되고 액체헬륨 없이도 초전도체는 물론 여러가지 저온실험을 할 수 있게 되었다.

SQUID가 상용화 되고 여러가지 응용이 가능함에 따라 이에 필요한 냉각기가 개발되었는데 1977년 미국 NBS의 Boulder 저온연구실의 Zimmerman과 Radebaugh<sup>6)</sup>는 값싸고 수명이 긴 다 단계 냉각기를 개발하여 4K 영역까지 내리는데 성공하게 하였다.

저온 초전도체의 전이온도는 20K 이상에 이르는 것도 있으나 많이 사용되는 초전도체는 대략 10K 이하(Nb: 9K, Pb: 7.2K)이므로 초전도 장치를 이용하기 위해서는 10K 이하까지 내리는 냉각기가 필요하다. 온도가 낮을수록 성능이 향상되므로 헬륨의 액화온도까지도



C: compressor, GM: drive head, CY: cylinder, G: pressure gauge, H1: 77K exchanger, A: adsorber, H3: 12K exchanger, H2-H4: counterflow exchangers, RS: radiation shields, J-T: constriction and expansion chamber. (참고문헌 6)

Fig.2 Schematic of the cryocooler

냉각하는 것이 유리하며 이런 경우에는 대개 Stirling이나 G-M 냉각기와 J-T 냉각기를 결합한 구조를 가지는 것이 일반적이다. Fig. 2에 G-M 냉각기와 J-T 밸브를 결합한 SQUID 냉각용 소형극저온냉각기의 개략도가 나와 있다.<sup>6)</sup>

#### 4. DC SQUID 개발

SQUID는 조셉슨 접합을 포함하는 초전도 고리를 통과하는 자속이 양자화 되는 현상을 이용하여 자장을 정밀하게 측정할 수 있는 장치이다.

1962년 B. D. Josephson<sup>7)</sup>이 Cooper pairs가 얇은 절연체를 통하여 흐를 수 있다는 조셉슨 tunneling에 대한 이론을 제시하고 곧이어 실험적으로 증명되었으며 이 조셉슨 전류, 혹은 초전류(super current)는 외부자장에 대하여 주기적인 변화를 보이며 그 주기가 자속 양자  $\phi_0 = h/2e(2.07 \times 10^{-16} \text{ Wb})$ 라는 것도 확인되었다.

조셉슨 접합을 초전도체로 연결한 SQUID에는 두 종류가 있다. 하나의 조셉슨 접합을 이용한 rf SQUID와 두 개의 조셉슨 접합을 사용하는 dc SQUID인데 dc SQUID의 경우 초전류가 자속의 변화에 따라 마치 두 개의 slit를 통과하는 빛의 회절과 같으므로 초전

도 양자간섭장치(Superconductive Quantum Interference Device; SQUID)라는 이름이 붙게 된 것이다.

Fig. 3에 dc SQUID의 개략도와 전류-전압 특성, 그리고 일정한 전류가 흐를 때 전압과 자속과의 관계가 나와 있다.

1970년에 미국의 S. H. E.사에서 처음으로 상용화된 rf SQUID가 생산된 이래로 미국, 영국 등 몇 개 회사에서 생산 공급하고 있다. dc SQUID는 제작의 어려움 때문에 rf SQUID보다 개발이 늦어졌는데 1976년 J. Clarke<sup>8)</sup> 등이 Nb-NbOx-Pb tunnel 접합을 이용한 실린더형의 dc SQUID를 개발하면서 rf SQUID보다 나은 성능을 갖게 되었고 그후 박막제작 기술의 급속한 발달로 박막을 이용한 dc 및 rf SQUID의 성능이 크게 향상되었다. dc SQUID는 최근에 상용화 되었으며 rf SQUID보다 향상된 특성을 보이고 있고 SQUID의 감도는  $10^{-32} \text{ J/Hz}$ 로 플랑크 상수  $h$ 에 근접하게 됨으로써 불확정성 원리와 관련하여 관심의 대상이 되고 있다.

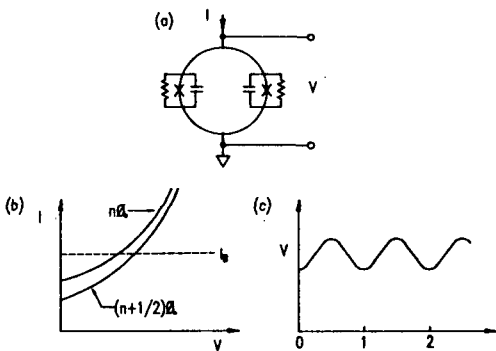


Fig. 3 (a) Schematic representation of dc SQUID, (b) I-V characteristics for  $\phi = n\phi_0$  and  $(n+1/2)\phi_0$ , (c) V versus  $\phi$  for constant current bias

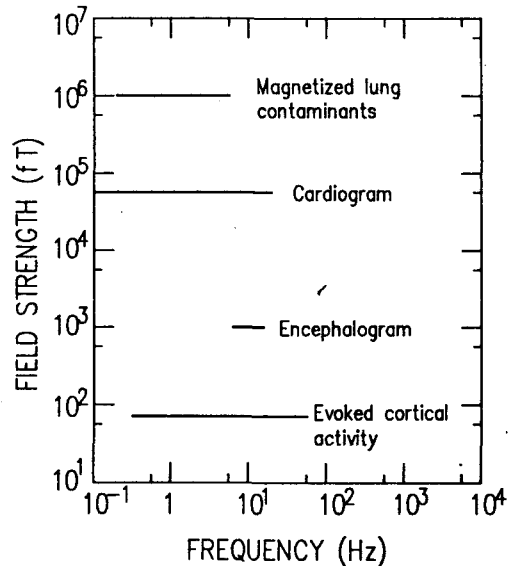


Fig. 4 Typical amplitudes and frequency ranges for various biomagnetic effects. Field strength in SI units is given in terms of the magnetic induction expressed in femtotesla, or  $10^{-16} \text{ T}$

SQUID의 응용은 자장, 전류, 전압 등의 정밀측정을 비롯하여 지구물리학, graviton의 감지, quark 탐색 등 물리학에서는 이미 많이 사용되고 있으며 특히 생체자기학 분야에서 그 응용도가 점차로 확대되고 있다. 사람의 심장이나 뇌에서 발생하는 자장의 세기는 수백 picotesla에서 수십  $fT(=10^{-15} T)$ 에 이르고 있다.

Fig.4에 인체의 각 부위에서 발생하는 자장의 특성이 나와 있는데 측정부위에 따라 자장의 세기, 주파수 영역, 자장의 분포 형태가 다르다. 이와 같은 작은 양의 자장을 감지하는 것은 SQUID를 사용하여야만 가능하며 외부 자장을 완전하게 차폐한 후에 측정을 하여야만 한다. SQUID를 이용한 생체자기학은 박막기술을 이용한 집적화된 SQUID 센서가 발달됨에 따라 더욱 활발해질 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

극저온기술은 우주기술(space technology)이나 생체자기학과 같이 첨단기술을 개발하기 위해서는 필수적인 기반기술이다. 초고속 자기부상열차나 미래의 에너지 문제를 해결할 열쇠인 핵융합, MHD 발전 등에도 꼭 필요하다.

극저온기술은 대개의 경우에 최종 생산품이 아닌 하부구조(infrastructure)의 특성을 가지기 때문에 소홀히 되는 경향이 있으며 이제까지 선진국에 의해 독점되어 왔다. 또한 국가적인 차원의 육성이 필요한 것도 이와 같은 이유에서이다.

우리나라가 21세기에 가면 과학기술분야에서 세계 10대 선진국의 하나로 발돋움하기 위

해 계획을 수립하고 추진하고 있는 이때 극저온기술에 관심은 갖는 것은 당연하며 소규모이기는 하나 극저온냉동기 개발과 dc SQUID 개발을 추진하는 것은 매우 고무적인 사실이다. 더욱이 최근에 일어난 고온초전도체의 발견은 이와 같은 경향을 더욱 가속화할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. H. Kamerlingh Onnes, Leiden Comm. 108 (1908).
2. H.K. Lee, H.C. Kwon and J.C. Park, J. Kor. Phys. Soc. 21, 117 (1988).
3. 박종철, 이규원, 김인선, KSRI-88-15-IR, 과학기술처(1988).
4. S.W. Lee et al., Study on Superconducting Magnetic Energy Storage, KRC-84S-TO5 (1986).
5. J.E. Zimmerman and R. Radebaugh, "Operation of SQUID in a very low-power cryocooler" NBS sp508, 59 (1978).
6. S. Barbanera, SQUID '85, Superconducting Quantum Interference Devices and their applications, ed. H.D. hahlfohm, H. Lubbig, (1985).
7. B.D. Josephson, Physics Letters, 1, 251 (1962).
8. J. Clarke, W.M. Goubau and M.B. Ketchen, Tunnel junction dc SQUID: Fabrication Operation and Performance, J. Low Temp. Phys. 25, 99-144 (1976).