



한국의 저온 공학 연구 현황

김 영 인
한동대학교 기계금속공학부 교수

1. 서언

한국초전도·저온공학회가 1998년 8월에 창립되어 저온공학분야의 연구 활동 구심체가 되어 연구 활성화가 기대되는 시점이므로 본고에서는 지금까지의 국내에서의 연구수행 결과와 현재 진행되는 주요 연구과제에 대해 정리하고 소개하여 차기 연구자에게 도움이 되고 저온공학분야 연구활성화에 기여하도록 하였다.

국내에서 저온공학에 대해 관심을 갖게 된 것은 1970년대 에너지 자원의 다양화를 위해 인도네시아 등지에서 액화천연가스를 수입하면서 한국가스공사에서 LNG 기지를 건설하고 LNG를 기화시키면서 얻을 수 있는 냉열을 이용하는 방안을 모색하면서부터이다. 그러나 당시 상황에서는 이 분야 전문인력의 부족으로 한국과학기술연구원(1)와 동력자원부(2)가 LNG 사업타당성에 대한 조사연구하는 단계에 머물렀으며 구체적인 연구가 진행되지 못하였다. 1980년대에 들어 와서는 대성산소(주)가 공기분리장치를 세워 액체 공기 및 질소를 생산하면서 저온관련 연구의 필요성을 인식하여 대성산소 초저온연구소를 세워 저온장치 개발연구를 시작하게 되었다.

또한 서울대학교 한국표준과학연구원에서도 헬륨 액화기를 설치하여 저온에서의 물성치 연구 및 초전도자석을 이용한 에너지 저장연구 등을 수행하였다. 그러나 본격적인 연구가 시작 된 것은 1987년 고온초전도체가 발견되면서 전세계의 관심이 새로운 고온 초전도체의 개발에 쏠리게 되어 국내에서도 1998년 국가의 연구비 지원에 의해 극저온기술 개발 연구가 시작되면서 부터이다. 1990년대에는 저온공학을 전공한 연구자들의 귀국과 국가핵융합과제(KSTAR Project) 등의 시작으로 연구가 활성화되어 가고 있다.

2. 국내 저온공학의 시작

국내에서 저온관련하여 체계적인 연구는 1980년대 한국표준과학연구원이 저온관련 물성치를 측정하기 위하여 헬륨 cryostat 개발, 희석냉동기 개발을 수행함으로써 시작이 되었다. 그 후에 1987년에 고온초전도체의 출현에 의해 극저온기술개발에

표 1. 극한기술 분야 중 극저온기술 개발 관련 국가 연구기관(1987-1991)

연구기관	연구책임자	연구주제	연구내용
한국표준연구원	박종철	SQUID 개발	DC SQUID 개발
한국과학기술연구원	김영인	극저온냉동기 개발	SQUID냉각용, 100W @4.2K
한국기계연구원	최현오	극저온펌프개발	진공도 10 ⁻⁸ torr
한국동력자원연구소	최현오	극저온냉동기 개발	냉각용

대하여 정부가 관심을 두고 극저온기술개발분야에 대한 지원을 하게 되어 표1과 같이 4개의 국가연구기관이 1988년부터 3년간 연구를 수행하게 되어 연구가 활성화되기 시작하였다(3)(4)(5). 한국표준과학연구원은 1988년 극저온 기술개발 지원에 의해 초전도 양자간섭장치(SQUID)인 DC SQUID Gradiometer, Ramp edge SQUID의 개발 연구를 시작하였다. 또한 SQUID를 작동하기 위해 극저온이 필요하여 charcoal이 내장된 희석냉동기를 개발하였다(6). 그림1은 한국표준과학연구원에서 개발한 ³He 냉동기를 보여주고 있다.

한국기계연구원에서도 1988년 극저온진공펌프(Cryopump) 개발을 시작으로 극저온 관련 연구를 수행하여 국내 국가연구소 중에서 지금까지 가장 활발하게 이 분야의 연구를 수행하고 있다. 한국기계연구원은 Gifford-McMahon냉동기를 이용

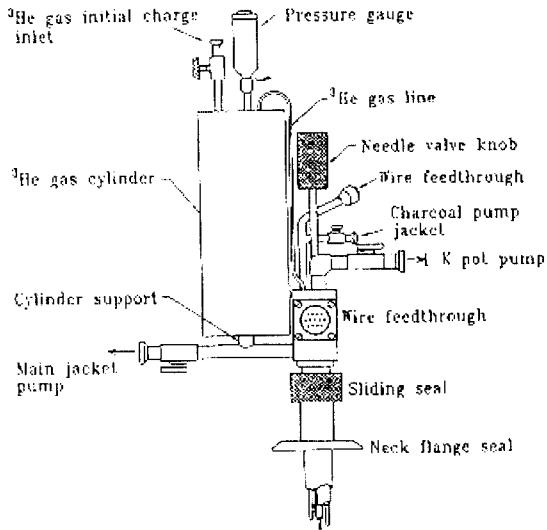


그림 1-a. 한국표준과학연구원이 개발한 ³He 냉동기 상단부



그림 2. GM-JT 냉동기 내부

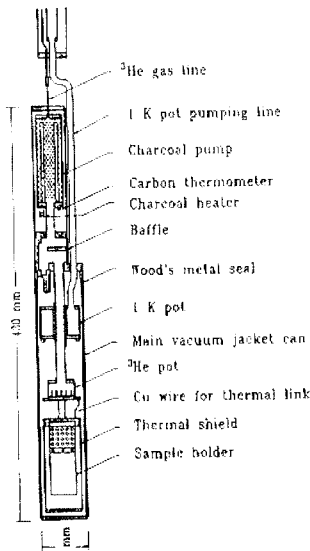


그림 1-b. 한국표준과학연구원이 개발한 ³He 냉동기 하단부

그림 1. 한국표준과학연구원에서 개발한 ³He 냉동기

하여 약 10^{-8} torr 정도의 고진공도를 유지하는 Cryo-pump를 개발하였다[7]. 또한 2 단 Gifford-McMahon 냉동기로 예냉하는 Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기를 결합한 극저온 냉동기를 개발하였는데 냉동능력은 20K에서 11W를 나타내었다[8-11]. 그림 2는 한국기계연구원에서 Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기를 결합한 극저온 냉동기의 내부 모습을 보여 주고 있다.

1993년 부터는 세계적으로도 개발에 관심이 집중

되고 있던 맥동관냉동기(Pulse tube refrigerator)에 대한 연구를 수행하기 시작하여 맥동관냉동기의 유형별 사이클해석 및 시뮬레이션, 시스템 설계 및 제작기술, 맥동관냉동기의 맥동관(Pulse tube) 내부와 재생기(regenerator)에서의 열전달현상을 연구하였다. Basic type, Orifice type, Double inlet type 등 다양한 종류의 맥동관 냉동기에 대한 기초연구를 수행하였으며 성능향상과 저온 도달 온도를 낮추기 위해 1단, 2단 및 3단 Double inlet type pulse tube를 연구중이다. 2-stage Double inlet 맥동관냉동기로는 20 K에서 0.45W의 냉동능력을 보였고 최저도달온도는 18.3 K 였다. 3-stage Double inlet 맥동관냉동기는 77 K에서 5 W의 냉동능력을 보였고 최저도달온도는 52.7 K 였다[12-21]. 그림 3은 single-stage pulse tube refrigerator의 개략도이며, 그림 4는 2-stage pulse tube refrigerator의 개략도이고 그림 5는 한국기계연구원에서 제작한 3-stage pulse tube refrigerator의 외관이다.

한국과학기술연구원에서는 극저온기술개발사업의 연구과제로 1988년에 SQUID 냉각을 위해 4.2K에서 100W의 냉각능력을 갖는 Gifford-McMahon 냉동기로 예냉하는 Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기가 결합한 극저온 냉동기 개발을 시작하였다[22]. 그러나 1989년 연구팀이 생산기술연구원으로 이전하여 계속 연구를 수행하였고[23-25] 한국과학기술연구원에서는 일시 이 분야 연구가 중단되었다. 그림 6은 GM/JT 조합 극저온

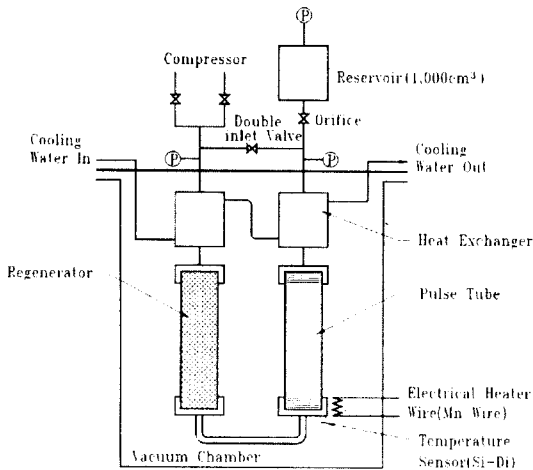


그림 3. single-stage pulse tube refrigerator

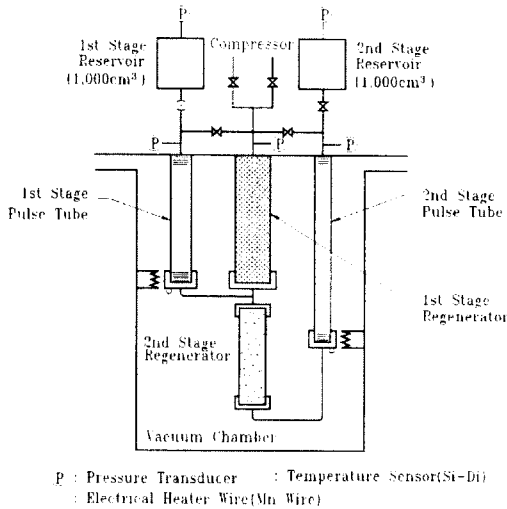


그림 4. 2-stage pulse tube refrigerator

냉동기의 개략도이다. 생산기술연구원에서는 질소 액화기 설계 및 제작에 대한 연구도 수행하였다 [26]. 한국과학기술연구원에서는 일시 이분야 연구가 중단되었다가 1991년 이후 Stirling cryocooler와 수소저장을 위한 액화장치 개발을 수행하고 있다. 수소액화장치개발을 위해 Gifford-McMahon 냉동기로 예냉하는 예냉장치, 열교환기, 수소정제장치, ortho-hydrogen에서 para-hydrogen으로 변환시키는 변환장치, 수소액화사이클의 선정 및 시뮬레이션 등을 개발연구를 진행중이다[27-30].

3. 국내 저온공학관련 주요연구기관

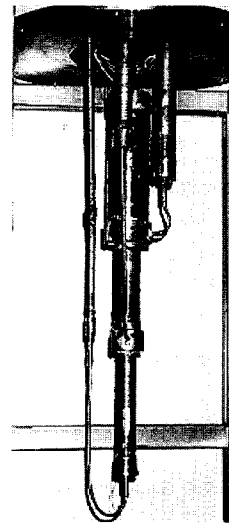


그림 5. 3-stage double inlet pulse tube refrigerator

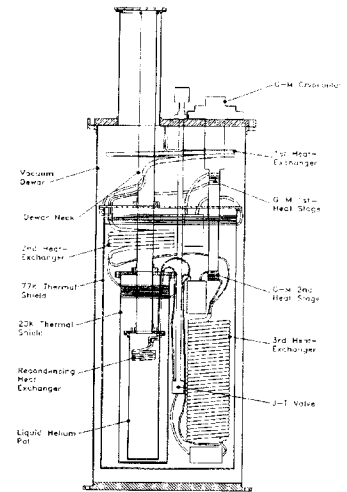


그림 6. GM+JT 조합 극저온 냉동기의 개략도

기초과학지원연구소는 기초과학 발전 및 육성을 위해 1988년 설립되어 대학, 연구기관 및 기업체의 연구지원을 수행하여 오다 저온공학을 전공한 김동락박사가 이 연구소에 참여하면서 부터 본격적인 극저온 연구가 진행되고 있다. 1K~5mK의 극저온에서 물성을 연구하기위해 ^3He - ^4He 희석냉동기를 개발하였고 핵자기냉각법으로 1mK 이하의 초저온을 발생하는 기술을 보유하고 있다. ^3He 고체-액체의 상분리곡선에서의 용해압력을 측정하여 1K 이하의 온도의 측정에 이용하는 연구와 양자액체 ^3He 및 ^4He 의 초유동성에 관한 연구[31-39], TOKAMAK의 Neutron Beam Injector (NBI)와 관련하여 냉각시스템에 대한 연구를 수행하고 있다[40].

홍익대는 대학 중에서 이 분야 연구를 가장 활발히 수행하고 있으며 정은수교수는 Basic Pulse Tube Refrigerators에서의 2차유동 해석, double inlet pulse tube refrigerator에서의 엔탈피 이동등 Pulse tube 내부에서의 유동에 관한 수치해석연구를 주로 수행하고 있다[41-46]. 또한 열음향냉동기에 대한 수치적모델을 제시하는 연구활동을 하고 있다[47]. 장호명교수는 실제기체 물성을 이용한 Stirling냉동기에서의 단열해석[48-50], Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기가 결합한 극저온냉동기 개발[51-52], 터보팽창기를 이용한 2단팽창 Claude 냉동사이클 해석[53]에 대한 연구를하였다. 장호명교수는 또한 극저온냉동기 예냉 수소액화기의 기초설계,

상용 극저온냉동기를 예냉기로 채택한 수소액화시스템의 성능 해석 등 수소액화 시스템 Simulation 및 설계기술 개발[27-28]을 수행하였고, 그림7은 상용 GM 극저온냉동기를 예냉기로 채택한 수소액화시스템을 보여 주고 있다. 최근에는 극저온 냉동기로 냉각되는 초전도 전류도입선(HTS Current leads)의 최적설계, 고온초전도 복합재 실험용 저온조의 설계, 고온초전도 복합소재의 열적 안정성 해석 등 초전도 전류도입선에 관한 여러편의 좋은 논문[54-59]을 발표하고 있으며 그림 8은 냉동기로 예냉되는 이중전류도입선이 있는 초전도시스템의 개략도를 보여 주고 있다. 그는 또한 LNG냉열의 효과적 이용을 위한 LNG개방래크기화기(open rack vaporizer)의 해석 및 설계 [60], 극저온 냉동기에서의 Shuttle Heat Transfer[61] 등을 수행하였다.

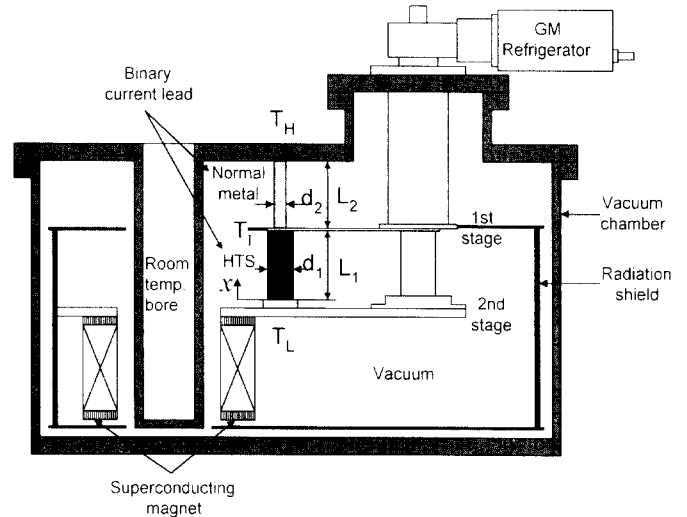


그림 8. 냉동기로 예냉되는 이중전류도입선이 있는 초전도 시스템 개략도

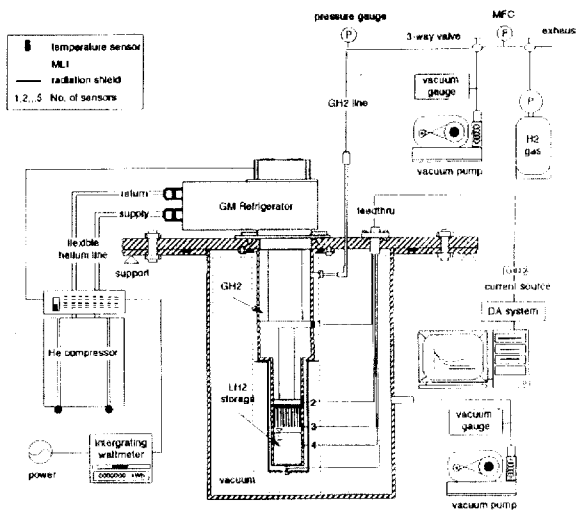


그림 7. GM 냉동기를 사용한 수소액화 시스템

서울대에서는 초전도발전기의 냉각 시스템 개발을 위해 초전도 발전기의 열교환장치에 대해 모델링을 수행하였고 냉매인 헬륨의 유동에 관련된 실험상수를 결정하기 위해 저온조에서의 열교환실험을 수행하여 열교환기로서 다공성매질을 이용하면 냉매 순환량을 약22% 감소시킬수 있다고 제시하였다[62]. 노승탁교수는 LNG Tank에서 사용 가능한 LNG냉열이용 능력에 대한 열역학적 해석 연구를 시도하였다[63]. 해양대에서는 LNG관련 연구로는 냉열이용(LNG Cold Utili-

zation) 방안으로 페타이어의 저온분쇄(Cold Crushing System)에 대한 연구[64]와 LNG Carrier Tank(A Simulation for the Temperature Profile of the Vapor Space in the Moss-type LNG Carrier Tanks)에 관한 연구[65] 및 열음향냉동기 최적설계[66] 등에 관하여 연구하고 있다. KAIST의 정상권교수는 77 K에서 작동하는 Pulse tube refrigerator에 대한 연구와 SC cable-In-Conduit Conductor에서의 Thermohydraulic behavior, superconducting generator에 대한 열적 해석과 설계에 대한 연구를 수행하고 있으며[65-75] 그림9는 CICC(Cable-In-Conduit Conductor) 초전도 자석에 필요한 초임계 헬륨 생성장치를 보여

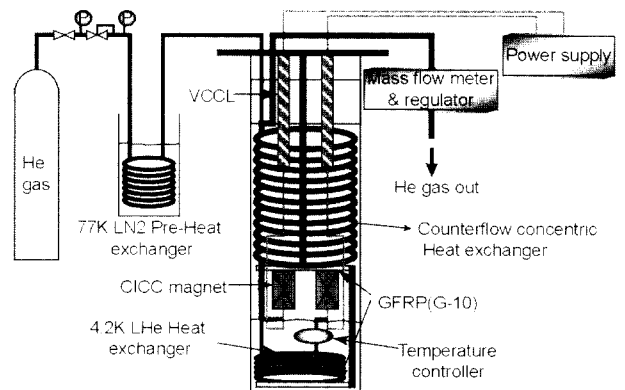


그림 9. KAIST CICC 초전도 자석에 필요한 초임계 헬륨 생성장치

주고 있다. 송태호교수는 열음향냉동기에 관한 연구결과를 발표하였다[76].

대성산소의 초저온연구소에서는 1989년에 설립되어 민간기업으로는 가장 활발하게 초저온 장치 전반에 대한 개발 연구를 수행하고 있다. 초저온 연구소는 극저온을 이용한 가스제조장치 및 저온 공기 분리장치(Air separation system), 액화가스저장탱크, 초저온펌프, LNG장비, cryostat 등을 개발하고 있고 아울러 극저온 재료의 물성을 연구하고 있다. 초저온연구소에서 개발한 진공단열배관(vacuum-insulated pipe)은 크기가 8A 부터 200A 까지의 다양한 크기를 갖고 있으며 사용자의 요구에 따라 초저온밸브가 장착된 배관시스템을 설계 제작하여 제공하고 있다. 연결방법에 따라 테프론의 수축성질을 이용한 셸(seal)을 사용한 bayonet형 연결방법의 진공단열 배관시스템과 용접형 진공단열 배관시스템을 제공하고 있다. 또한 초저온연구소에서는 perlite를 사용한 진공분말 단열(evacuated powder insulation)을 사용하여 진공도가 10^{-3} torr이며 용량은 $3m^3$, $10m^3$ 인 액화저장탱크(cold evaporator tank)를 개발하였으며 사용온도와 압력은 각각 $-200^{\circ}C$, $20kgf/cm^2$ 으로 산소, 질소, 알곤 등 산업용 액화 가스를 저장할수 있다. 초저온연구소가 개발한 초저온 액화가스펌프(cryogenic pump)는 200 bar 용 왕복동식 펌프로써 NPSH(Net Pressure Suction Head)는 약 1.0 m 정도이며 용량은 $50 Nm^3/hr$ 이고 피스톤은 스테인레스스틸 STS304를 사용하여 반복 펌핑에도 사용가능하도록 하였다. 원심펌프는 압력이 약 12 bar 이며 용량은 200 liter/min이며 NPSH는 약 0.3m 로 임펠라는 인칭동을 사용한 폐쇄형(closed type)으로서 mechanical seal로 teflon seal을 사용하여 반복적인 열적변동에도 사용 가능하도록 하였다.

액체질소형 cryostat는 passive type으로서 24 시간 사용이 가능하고 펌핑을 하면 65K 까지 온도도달이 가능하다. 온도제어는 0.05K까지 가능하며 8개의 coaxial cable 과 20개의 실험용 전선, 2개의 열선(heater wire)을 장착할 수 있다.

초저온연구소에서는 저온공기분리장치에서의 정류탑에 사용되는 packing type을 개발하였고 cold box 내에서의 공정(Process design at low temperature)에 대한 연구를 수행하고 있다. [40] 이 연구소에서는 LNG연료탱크, 헬륨액화기, 극저온냉동기(cryocooler), 극저온진공펌프

(cryopump), mini-cryocooler등을 개발할 예정이다. CVE (Cryogenic & Vacuum Engineering Co., Ltd)는 극저온장비인 Cryostat, Liquid Helium transfer tube, high vacuum system, vacuum insulated tube, superconducting system 등을 취급하고 주문에 의해 생산하고 있다.

vacuum insulated tube는 superinsulation을 사용하고 있으며 연결방식은 bayonet형과 flexible bellows를 사용하고 있다. MRI용 초전도저장냉각용 passive type cryostat를 개발하여 생산하고 있다.

한국가스공사의연구개발원(Korea Gas Corporation, R & D Center)은 1990년에 개원하여 LNG관련 전반적인 기술 개발연구를 수행하였다. 액화천연가스설비 및 장비를 개발하는 초저온연구팀은 약 30여명의 연구원으로 구성 되어 연구를 수행하고 있다. 연구팀은 LNG용 초저온 저장용기에 사용되는 Membrane을 개발하여 LNG선박과 LNG Tank의 내용기 벽면에 설치하고 있다. 선진국의 제품이 사각형 또는 원형으로 주름진 단순한 기하학적구조를 갖고 있으나 연구개발원의 제품은 중앙원형주름과 그 주변에 4개의 직선 주름으로 구성되어 있다.

한국전력공사의 전력연구원(Korea Electric Power Corporation, Research Institute)은 초기에는 LNG 냉열이용에 대한 연구를 수행하다가[77] 현재는 전력발생, 전력수송 및 안전에 대한 연구를 수행하고 있으며 초전도고압전선의 냉각을 위해 액체 질소를 사용하는 연구를 진행 중이다. 또한 냉중성자원 장치와 관련하여 삼중수소 제거기술(tritium removal facility)을 개발하고 있다.

LG전자의 리빙시스템연구소(LG Electronics Inc., Living System Lab.)는 Stirling cycle의 가정용냉동고에의 응용가능성에 대해 연구를 수행하여 Stirling-Rankine cycle Heat Pump system을 개발하여 $-150^{\circ}C$ 의 온도에 도달하였다 [78-79].

한국전기연구소는 극저온 송전시스템 개발연구 [80]를, 인하대에서는 LNG냉열을 이용하기 위하여 LNG 기화기에 대한 연구[81-83]를 수행하였고 영남대에서는 Collins 냉동기에 대한 연구[84-85]를 수행한 바 있으며 이화여자대학교, 성균관대학교, 서강대학교, 중앙대학교 등에서는 극저온

물성을 연구하고 있다.

표2는 극저온기술에 대한 연구기관과 연구 진행 상황을 보여 주고 있다.

표 2. 연구기관별 연구현황

구분	연구 주체	연구분야	연구내용
국 가 연구기관	한국표준과학연구원	극저온측정	온도측정, cryostat
	기초과학지원연구소	극저온 발생	dilution refrigerator
		극저온물성측정	융해압력, 극저온온도측정, 초유동성
	한국과학기술연구원	수소액화시스템	Simulation, 설계기술, Stirling cycle
	한국기계연구원	극저온냉동기	pulse tube refrigerator, 열음향냉동기, Gifford-McMahon cryocooler
		Cryopump	Stirling cryocooler- duplex type
	한국생산기술연구원	극저온냉동기	2- stage GM/JT, 질소액화기
	한국원자력연구소	에너지저장	냉증성자원 장치 개발
한국전기연구소	전력수송	극저온 송전시스템	
대 학	홍익대	극저온냉동기	Pulse tube, Stirling, Claude
		HTS current lead	Thermodynamic optimization
		LNG	냉열이용, 기화기,
	KAIST	냉동기	Pulse tube(77 K), HTS Currents
	서울대	에너지저장	초전도 자석 이용 에너지 저장, LNG
	해양대	LNG	LNG 냉열이용 분쇄기, LNG Carrier
	전남대	HTS current lead	HTS Currents lead
	영남대	극저온냉동기	Pulse tube, Collins cryocooler
한동대	극저온냉동기	Pulse tube	
기 업	대성산소(주) 초저온연구소	저온장비	Liquid gas container, pulse tube, cryogenic pump, vacuum insulated pipe, cryogenic valve, cryostat., Process design(air separation)
	LG전자	냉동	Pulse tube, Stirling cooler
	한국전력공사 전력연구원	전력수송	Power transmission, 삼중수소제거
	한국가스공사 연구개발원	LNG	LNG Tank, Membrane, Material and gas property
	현대중공업	LNG	LNG carrier
	삼성전자	냉동, 단열	
	CVE	저온장비	Vacuum system, vacuum insulated pipe, cryostat,
	(주)한비	저온장비	Liquid gas container

4. 주요 연구 주제

극저온분야에서는 저온생성 및 보존 유지장비에 대한 연구가 주요 연구주제이며 연구초기에는 극저온 냉동기 개발에 대한 연구가 활발히 수행되었으며 결과를 요약하면 표3 과 같다. 참고문헌 86에는 국내의 극저온 냉동기 개발현황이 요약되어 있다.

다양한 종류의 극저온 냉동기중에서 현재는 맥동관 냉동기(Pulse tube refrigerator)에 대한 연구가 국내외 적으로 가장 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 홍익대와 한국기계연구원에서 연구가 활발히 진행 중이다. 표4 는 맥동관냉동기에 대한 국내의 연구 현황을 보여 주고 있다.

5. 결어

지금까지 국내 저온공학관련 연구수행 결과와 진

행 상황을 살펴 보았으며 참고문헌에는 국내에서 발표된 저온 관련 논문과 연구 보고서의 일부 목록을 수록하여 차기 연구에 도움이 되도록 하였다. 한국에서의 저온공학관련 연구는 20년 밖에 되지 않으나 대형과제인 전력저장장치개발, 전력수송 장치개발, 연구용 원자로개발 등의 연구과제의 증가와 전문연구인력의 증가로 2000년 대에는 활발히 연구가 진행될 것으로 기대된다.

후기(감사의 말)

본고 작성에 필요한 자료를 제공해 주신 홍익대의 정은수교수, 장호명교수, 한국해양대의 윤상국교수, 한국과학기술원의 정상권교수, 기초과학지원연구소의 김동락박사, 대성초저온연구소의 박두선박사, 이현철박사, 한국기계연구원의 고득용박사, 박성제박사, LG전자의 조관식박사께 감사를 드립니다.

표 3. 극저온냉동기 개발 현황

종 류	응용분야	연구기관	연구내용
pulse tube	냉각	홍익대, KIMM	Basic, Orifice, Double inlet type
GM	Cryopump	KIMM	설계, 제작, 자성체축냉재사용
GM + JT	SQUID냉각	KAITECH, KIMM	2-stage GM+ JT
Claude	냉각	홍익대	2-stage turboexpander, 유량
Collins	냉각	영남대	COP, 냉동능력, 질량유량영향
Dilution	저온측정	KBSI, KRISS	1 K 미만
JT	냉각	KAITECH, KIST	질소액화기, 수소액화기 설계
Stirling	냉각	홍익대, LG전자, KIMM	adiabatic analysis

표 4. Pulse tube refrigerator에 대한 연구현황

종류	연구팀	연구내용	참고문헌
Basic type	홍익대	Secondary Flow	41, 44-46
Orifice type	KIMM	Numerical analysis	42
	홍익대		
Double inlet type	KIMM	Numerical analysis 2-stage rotary valve 맥동관냉동기 성능특성 3 단 맥동관냉동기 성능특성실험	12-14, 43
	홍익대		

참고문헌

1. 액화 천연 가스의 사업 타당성에 관한 예비 조사연구, 한국과학기술 연구소 BS 1609-1010-8, 1977. 12.
2. LNG 사업에 대한 예비조사보고, 동력자원부, 1978. 10.
3. 권혁찬, 이용호, 김진목, 박종철, "DC SQUID의 개발연구," 제3회 극한기술개발 종합심포지움 논문집, pp.49-55, 1991.
4. 이순걸, 권혁찬, 김진목, "1K 이하의 극저온 연구," 제3회 극한기술개발 종합심포지움 논문집, pp.40-48, 1991.
5. 김영울, 한홍도, 강채동, 김영인, "Joule-Thomson 냉동기와 Gifford-McMahon 냉동기를 조합한 극저온 냉동기의 성능 분석," 제3회 극한기술개발 종합심포지움 논문집, pp.34-39, 1991.
6. S.G. Lee and H.C.Kwon, "Compact ³He cryostat for use in thermometry," Cryogenics, Vol.33, No.7, pp.742-744, 1993.
7. CRYOPUMP 설계기술 개발(1),(2),(3), 한국기계연구원보고서, 1991.
8. 박성제, 고득용, 유창중, 김의준, 최현오, "2단 Gifford-McMahon 극저온 냉동기의 특성실험," 공기조화 냉동공학 논문집, 제5권, 제3호, pp.198-206, 1993.
9. 박성제 외, "Gifford-McMahon 극저온 냉동기의 특성실험," 공기조화 냉동공학회, 부산, 경남지부 춘계학술대회, 1992. 5.
10. S.J. Park et al., "An Experimental Study of Two-Stage Gifford-McMahon Cryo-refrigerator," The 3rd World Conference on E.H.T.F.M.T.(USA), 1993. 11. 1.
11. 박성제 외, "자성체 축냉재를 이용한 2단 Gifford-McMahon 극저온 냉동기의 특성실험," 공기조화 냉동공학회 부산, 경남지부 춘계 학술대회, 1992. 5. 7.
12. 박성제, 고득용, 이성진, 염한길, 홍용주, "2단 Rotary Valve 맥동관 냉동기의 특성실험," 공기조화 냉동공학회 '95동계학술발표회 논문집, pp.310-317, 1995.
13. 박성제, 고득용, 염한길, 홍용주, 박병규, "3단 맥동관 냉동기의 성능특성에 관한 실험적 연구," 공기조화 냉동공학회 '97하계학술발표회 논문집, 1997.
14. 박성제 외, "3단 맥동관 냉동기의 성능특성에 관한 실험적 연구," 공기조화 냉동 공학회 1997하계학술대회, 1997. 6. 21.
15. 박성제 외, "맥동관 냉동기의 유형별 성능특성에 관한 실험적연구," 한국기계연구원 논문집, 1994.12.
16. 朴聖濟, 高得龍, 劉昌鍾, 廉漢吉, 崔憲晤, "パルス管冷凍機の性能特性に關する實驗的研究," 第 52 回 1994年度 秋季 低溫工學 超電導學會 講演概要集, p. 209, 1994.11. 4.
17. 朴聖濟 외, "2段パルス管冷凍機に關する特性實驗," 第 53 回 1995年度 春季 低溫工學 超電導學會 講演概要集, 1995. 5. 19.
18. 朴聖濟 외, "Rotary Valveを用いたパルス管冷凍機の作動特性," 第 54 回 1995年度 秋季 低溫工學 超電導學會 講演概要集, 1995. 11. 3.
19. 박성제 외, "Pulse Tube 냉동기 특성실험, 공기조화 냉동공학회," 하계학술 대회, 1994.6.
20. 박성제 외, "Double Inlet 맥동관 냉동기의 성능특성 실험에 관한 연구," 공기조화 냉동 공학회 동계학술대회, 1994. 11. 26.
21. 박성제 외, "2단 맥동관 냉동기의 성능특성 실험," 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술대회, 1995. 2. 18.
22. 극저온용 냉동기 개발, 한국과학기술연구원 보고서 N552-3609-2, 1989.
23. 김영률, 이상용, 장호명, "소형 Gifford-McMahon/Joule-Thomson 냉동기에서 열교환기의 최적 조합," 대한기계학회 논문집, 제 16권, 제 11호, pp.2196-2202, 1992.
24. 극저온용 냉동기 개발, 생산기술연구원 보고서 KAITECH BS PNR0050-0006-1, 1990.
25. 극저온용 냉동기개발(III), 생산기술연구원보고서 KAITECH BS PNR 01500, 1991.
26. 질소액화기 설계 및 제작기술개발, 생산기술연구원 보고서 KAITECH BS PGR 00400, 1991.
27. 김승현, 장호명, 강병하, "극저온냉동기 예냉 수소액화기의 기초설계," 공기조화·냉동 공학 논문집, 제9권 제3호, pp. 389-400,

- 1997.
28. 백종훈, 강병하, 장호명, "직접냉각에 의한 수소액화장치의 성능실험," 공기조화·냉동공학 논문집, 제9권 제3호, pp. 284-291, 1997.
 29. 김승현, 장호명, 강병하, "상용 극저온냉동기를 예냉기로 채택한 수소액화시스템의 성능 해석," 수소에너지, 제9권 2호, pp.55-64, 1998.
 30. Seoung-Hyun Kim, Ho-Myung Chang, and Byung-Ha Kang, Basic Design of Hydrogen Liquefier Precooled by Cryogenic Refrigerator, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol.6, pp.124-135, 1998.
 31. 오수환, 안세경, 황상구, 박윤희, 홍창희, 류재연, 김두철, 김동락, "수직형 LPE(Liquid Phase Epitay)장치의 성능개선에 의한 다중 양자우물층 성장," 응용물리, 제 11권 제 3호, pp. 347, 1998.
 32. Sung chil Lee, Ji Yon Kim, Doo Chul Kim, Dong Lak Kim, Genyou Hu, and Jai Yon Ryu, "Transverse and Longitudinal Hot-Electron magnetophonon Resonance in n-type Germanium," J. Korean Phys. Society, Vol. 32, No.2, pp.138, 1998.
 33. Doo Chul KIM, Myeong Hwa KANG, Chi Kyu Choi, Jai Yon Ryu, Dong Lak Kim, and Tong Kun Lim, "Temperature Effect on the Kinetics of the Polysterne Aggregation Progress by Using Static and Dynamic Light Scatterings," J. Korean Phys. Society, Vol. 31, No.2, pp.271, 1997.
 34. 김동락, "초저온의 생성과 초저온의 측정방법," 물리학과 첨단기술, 제 6권, 제 5호, 1997.
 35. Ilsu Rhee, Gyojin Chu, Eui-Wan Lee, Sang-Yun Lee, Chong-Yong Lee, Yang-Soo Kim, Dong-Lak Kim, and H.-C. Ri, "Shift of Curie Temperature in Gadolinium Films due to Finite-Size Effects," Journal of the Physical Society of Japan, Vol.64, No. 2, pp.678, 1995.
 36. 채건식, 김영국, 김동락, "초유동 3He 과 경계조건," 경남대학교 기초과학연구소 연구논문집, 제7집, 1995.
 37. 이일수, 추교진, 이의완, 이상윤, 이종용, 김양수, 김동락, 이형철, "강자성 가돌리늄 박막의 큐리 온도의 이동," 한국진공학회지, 제 3권 제 3호, pp.305, 1994.
 38. 이일수, 김동락, "소자화 냉동을 통한 절대영도에의 접근," Proceedings of the 19th Condensed Matter Phys. Symp., 1996.
 39. Y.S. Ha, Y.W. Park, S.S. Yom, Jong-ku Park, S.T. Kim, D.L. Kim, H.C. Ri and Y.S. Kim, "Rapid thermoelectric power drop to zero at 250 K in superconducting Hg-compounds," Proceedings of ICSM 94, July, 1994.
 40. 냉중성자원장치의 극저온 기술에 관한 국산화조사, 대성 초저온 연구소, KAERI/CM-204/97, 1998.
 41. E. S. Jeong, "Secondary Flow in Basic Pulse Tube Refrigerators," Cryogenics, Vol.36, 1996.
 42. K. S. Lee, E. S. Jeong, and H. O. Choi, "Numerical analysis of an orifice pulse tube refrigerator," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 1994.
 43. 채왕병, 정은수, 최현오, "이중입구 맥동관냉동기의 수치적해석," 공기조화냉동공학논문집, 제 7권, 제 3호, pp.501-511, 1995.
 44. E. S. Jeong, "Effects of Axial Temperature Gradient on Momentum and Heat Transfer with Oscillating Pressure and Flow," KSME Journal, 1995.
 45. 이호진, 채왕병, 정은수, "맥동관냉동기의 2차속도와 온도," 공기조화냉동공학논문집, 제 9권, 제 2호, pp. 239-248, 1997.
 46. 강영구, 정은수, "맥동관 냉동기의 에탈피 이동," 공기조화냉동공학논문집, 제 10권, 제 2호, pp.190-192, 1998.
 47. 채왕병, 정은수, "열유향냉동기의 수치적모델," 공기조화냉동공학논문집, 제 8권, 제 1

- 호, pp.110-119, 1996.
48. Jong-Hoon Baik, Ho-Myung Chang, "An Adiabatic Analysis of Stirling Refrigerator with Real Gas Properties of Helium," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.4, pp.11-22, 1996.
 49. 백종훈, 장호명, "실제기체 물성을 이용한 Stirling냉동기의 단열해석," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 7권, 제 1호, pp. 150-160, 1995.
 50. 백종훈, 장호명, "압축기/팽창장치에서의 열전달을 고려한 Stirling 냉동기의 2차 해석," *공기조화·냉동공학 '95동계학술대회 논문집*, pp.297-304, 1995.
 51. Ho-Myung Chang, "Design of GM-JT Refrigerators," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.3, pp.1-11, 1995.
 52. 장호명, "4 K, 3 Watt 급 GM-JT냉동기의 최적 설계," *공기조화·냉동공학회 '93하계 학술발표회 강연 및 논문집*, pp.112-118, 1993.
 53. 백종훈, 장호명, "터보팽창기를 이용한 2단 팽창 Claude 냉동사이클 해석," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 6권, 1994.
 54. Ho-Myung Chang and Steven W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads," *Cryogenics*, Vol.38, 1998.
 55. Ho-Myung Chang and Steven W. Van Sciver, "Optimal Integration of Binary Current lead and Cryocooler," *Proc. of the 10th International Cryocooler Conference*, 1998.
 56. 송성재, 장호명, "극저온 냉동기로 냉각되는 이중전류도입선의 최적설계," *공기조화냉동공학논문집*, 제9권, 제 4호, pp.552-560, 1997.
 57. 송성재, 장호명, "냉동기로 전도 냉각되는 초전도 전류 도입선의 열역학 설계," *공기조화·냉동공학회 '98동계학술대회 논문집*, pp.90-95, 1998.
 58. 이훈, 장호명, "고온초전도 복합선재의 열적 안정성 해석," *대한기계학회, '95 추계 학술대회 논문집*, pp.676-681, 1995.
 59. 백종훈, 이훈, 김영권, 장호명, 홍계원, 이호진, "고온초전도 복합재 실험용 저온조의 설계," *공기조화·냉동공학 '95동계학술대회 논문집*, pp.370-377, 1995.
 60. 박정수, 장호명, "LNG 개방래크 기화기의 해석 및 설계," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 9권, 제 2호, pp.189-197, 1997.
 61. Jong-Hoon Baik, Ho-Myung Chang, "An Exact Solution for Shuttle Heat Transfer," *Cryogenics*, Vol. 35, 1995.
 62. 김국원, 정태은, 신호철, "초전도 발전기의 냉각 시스템," *공기조화냉동공학논문집*, 제 6권, 제4호, pp.446-453, 1997.
 63. 이근식, 장영수, 노승택, "LNG 추출과정과 냉열이용의 열역학적 해석," *공기조화 냉동공학 논문집*, 제7권, 제1호, pp.120-131, 1995.
 64. S.K. Yoon, "A Study on the Cold Crushing System of Waste Tires Using LNG Cold Energy," *J. Korean Solid Waste Engineering Society*, Vol.12 No2, pp.231-236, 1995.
 65. 윤상국, "LNG 냉열이용기술," *공기조화 냉동공학 '97동계학술발표회 논문집*, pp.604-609, 1997.
 66. 김동혁, "공명관식 열음향 냉동기의 최적설계를 위한 수치 모사 및 설계인자 분석," *공기조화냉동공학논문집*, 제7권, 제2호, pp.329-340, 1995.
 67. S.Jeong, M. Takayasu, J.V. Minervini and J.H. Schultz, "Ramp Rate Limitation Test of Cable-In-Conduit Conductors with Supercritical Helium," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.5, No.2, pp.210-213, 1995.
 68. S. Jeong et al., "Experimental study of AC losses in a Rutherford type cable," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.42, No.1, 1996.
 69. S.Jeong, J.H. Schultz, M. Takayasu, V. Vysotsky, P.C. Michael, W. Warnes, and S. Shen, "Ramp-rate limitation experiments using a hybrid superconducting cable," *Cryogenics*,

- Vol.36, No.8, pp.623-629, 1996.
70. S. Jeong et al., "Voltage spike observation in superconducting cable-in conduit conductor under ramped magnetic fields: 1. Experiment," Cryogenics, Vol.37, No.6, 1997.
 71. S. Jeong et al. "Spike voltages seen during 'Quick Charge' ramp limitation tests on Nb3Sn cable-in-conduit conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, 1997.
 72. S. Jeong et al., "Superconducting pulse coil set for stability test of superconducting cables," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, 1997.
 73. S. Jeong, "Current distribution in a 12 strand Nb3Sn cicc and its influence on ramp rate limitation," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp. ,1997.
 74. S. Jeong et al., "Measurements of current distribution in a 12-strand Nb3Sn cable-in conduit conductor," Cryogenics, Vol. 37, No.8, 1997.
 75. 정상권, "초전도 관내연선 도체의 한계자속변화에 대한 연구," 대한전기학회 논문집, 제46권, 제4호, 1997.
 76. 구분기, 송태호, "열음향 냉동기 스택에서의 열전도와 열펄핑해석 및 실험," 공기조화냉동공학 논문집, 제7권, 제3호, pp.473-487, 1995.
 77. LNG냉열발전 기술연구 종합연구보고서, 한국전력공사 기술연구원 보고서, KRC-84G-J06, 1985.
 78. Seon-Young Kim, Woo-Suk Chung, Dong-Koo Shin and Kwan-Shik Cho, "The Application of Stirling Cooler to Refrigeration," The 32th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1997.
 79. Sung-Tae Kim, Woo-Suk Chung and Kwan-Shik Cho, "Study of Stirling Cycle Refrigerator," The 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1993.
 80. 류강식, 조연옥, 윤문수, 안우희, "극저온 송전 시스템 개발," 제3회 극한기술개발 종합 심포지움 논문집, pp.17-24, 1991.
 81. Chong-Bo Kim and Seung-Tak Han, "Heat Transfer and flow characteristics of direct contact LNG evaporator," Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol.1, pp.3-10, 1993.
 82. 김성중, 한승탁, 김종보, "직접접촉식 LNG 기화기 응용을 위한 칼럼 열교환기 기포 특성에 관한 연구," 공기조화냉동공학논문집, 제3권, 제2호, pp.142-151, 1991.
 83. 이병철, 한승탁, 김종보, "증기응축용 열교환기의 냉각수 유량과 내부압 변화에 따른 열전달 특성연구," 공기조화냉동공학논문집, 제3권, 제3호, pp.153-160, 1991.
 84. 이상원, 김수연, 정평석, "Collins냉동기의 최적 설계조건," 공기조화냉동공학논문집, 제4권, 제3호, pp.183-190, 1992.
 85. Sang-Won Lee, Soo-Youn Kim and Pyung-Suk Jung, "Optimum Design Condition of the Collins Cryocooler," Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol.1, pp.40-46, 1993.
 86. S.J. Park, et al., "Cryogenic Engineering and Cryocooler Development in Korea," Proceedings of the Fifth Japanese-Sino Joint Seminar, Japan, 1997. 9. 16.