

SQUID 냉각장치용 극저온 시스템 개발

(Research of Cryogenic Helium Refrigerator System for SQUID)

이 금 배*, 백 일 현**
Kum Bae Lee, Il Hyun Baek

개 요

헬륨을 이용한 극저온 냉동기는 압축기(compressor)을 통하여 압력을 10-20 기압 정도로 높혀준후 여러 단계의 열교환기(heat exchanger)를 통하여 상전위온도(maximum inversion temperature) 이하로 떨어뜨린후 Joule-Thomson 밸브를 통하면 4 K까지 온도가 떨어진다. 이때 압력은 1 기압 정도이며 헬륨가스는 액체로 변한다. 본 연구의 목적은 Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기의 혼합형인 극저온 냉동기를 설계, 제작하여 조셉슨(Josephson) 소자를 이용한 SQUID(초전도 양자 간섭장치), 여러 종류의 탐지기, 컴퓨터 소자 개발 등을 위한 냉동기로 사용하는데 그 목적이 있다. 개발되는 냉동기의 용량은 1 W이며, 최저온도는 4 K 정도가 된다.

1. 서 론

극저온(cryogenic)이란 미국의 NBS에서 근무하는 한 과학자가 -150°C (123 K) 이하의 온도영역으로 정의하였으며, 그 이유는 영구 가스(permanent gas; He, H₂, Ne, N₂, O₂, etc..)들이 이 온도 이하에서 액체로 변하기 때문이다. 따라서 이 온도 이하에서 작동하는 냉동기를 극저온 냉동기(cryogenic refrigerator, or cryocooler)라 할 수 있다.

극저온에 대한 연구는 1870년대 Linde 와 Hampson이 최초로 기체공기를 액체로 전환시키는 액화기의 발명으로 시작되었으며, 그후 1911년 Onnes가 4 K에서 초전도재료의 발견으로 저온학이 새로운 학문으로 각광 받기

시작하였으며, 1940년대 독일에서 V-2 로켓의 개발과 더불어 우주 항공산업에 극저온 기술이 응용 발전되었다. 특히 미국은 1990년도 중반에 워싱턴과 동경을 두시간에 주파할 수 있는 액체 수소를 연료로 하는 항공기와 우주선의 혼합형인 "Orient 특급"을 연구 개발중에 있다. 이와같이 극저온 시스템은 우주 항공산업, 국방산업 및 최첨단 산업 등에 응용되고 있으며, 지금까지 미국, 일본, 영국 등 선진 몇개국에서만 연구가 추진되어 왔다. 국내에서는 극저온 시스템의 연구실적이 미비한 상태이며, 이는 기술부족 및 많은 연구비가 요구되기 때문이다.

극저온 냉동 시스템은 크게 4부분으로 구분하는데, 냉매의 압력을 높혀주는 압축기

* 한국동력자원연구소, 보일러연구실

** 한국동력자원연구소, 화석연료연구실

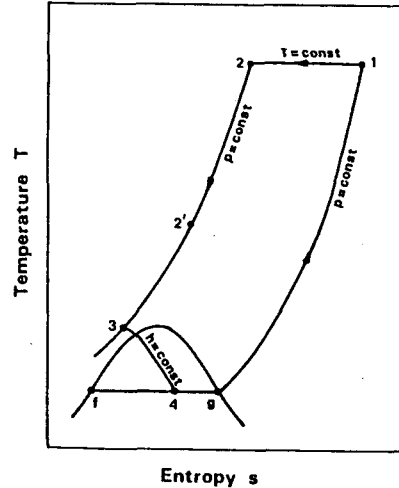
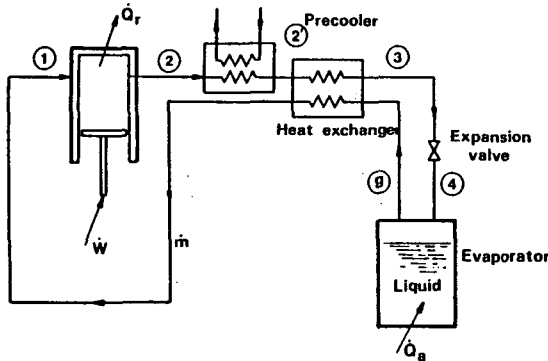


Fig. 1. The thermodynamically ideal Joule-Thomson refrigerator

(compressor), 냉매의 온도를 올려주고 내려주는 열교환기(heat exchanger) 및 그 부속장치, 소자를 실험하는 곳에 진공을 시켜주는 진공펌프(vacuum pump), 온도를 조절할 수 있는 제어기(controller) 등으로 구성되어진다. 위에 4요소 중에서 가장 중요한 부분이 열교환기이며 자동차로 치면 엔진에 해당되는 부분이다.

2. 극저온 냉동기의 기본원리

2.1 Simple Joule-Thomson Refrigeration System

그림 1은 이상적인 간단한 Joule-Thomson (J-T) 냉동 시스템의 개략도 및 T-S 선도를 보여주고 있다. J-T 냉동기의 주요 부분은 압축기, 열교환기, J-T 밸브, 증발기(evaporator) 등으로 구성되어 있다. 과정(process) 1-2를 통하여 압력이 증가하고 온도는 압축기내에서 공기나 물 등을 통하여 상온을 유지하도록 하고 있으나 실제로는 온도가 증가하고 있다. 과정 2-2'은 예냉기(precooler)를 통하여 압축된 냉매의 온도가 낮아지며, 이때 예냉기의 냉매로는 수소, 질소 또는 헬륨 등을 사용하고 있으며, 예냉기는 독립된 냉동기로 Gifford-McMahon 형태의 냉동기를 사

용하는 경우가 많다. J-T 냉동기의 냉매가 헬륨인 경우 예냉기가 필수적으로 부착되어야 한다. 과정 2'-3은 되돌아오는 낮은 온도의 냉매와 열교환이 이루어져 온도는 더 떨어지고 최종적으로 J-T 밸브를 통하여(과정 3-4) 냉매가 액체로 전환된다. 이때 팽창 과정에서 엔탈피는 일정하게 유지된다. 증발기로부터 열을 흡수한 액체의 일부가 증발하여 가스로 되고 이 가스는 열교환기를 거쳐 다시 압축기로 돌아가 계속 과정을 반복한다.

Joule-Thomson 냉동기에 장점은 밸브에 제작 및 조작과정이 간단하다. 팽창 엔진(expansion engine)을 사용하게 되면 엔진안에서 이상(two phase) 상태가 되는 경우 엔진에 무리가 생기나 팽창 밸브를 사용할 경우 이런 문제가 쉽게 해결된다. 단점인 경우 밸브에 오리피스가 매우 작기 때문에(보통 d=1mm정도) 냉매량이 작으며 따라서 용량이 작다. 또한 냉매에 불순물이 있으면 오리피스가 막힐 경우도 있다. 따라서 헬륨인 경우 순수도가 99.995% 이상되어야 한다.

2.2 Simple Gifford-McMahon Refrigeration System

그림 2은 이상적인 간단한 Gifford-McMahon(G-M) 냉동 시스템의 개략도 및 T-S

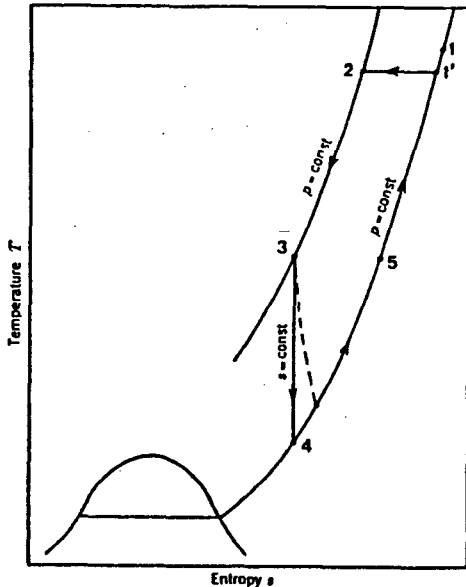
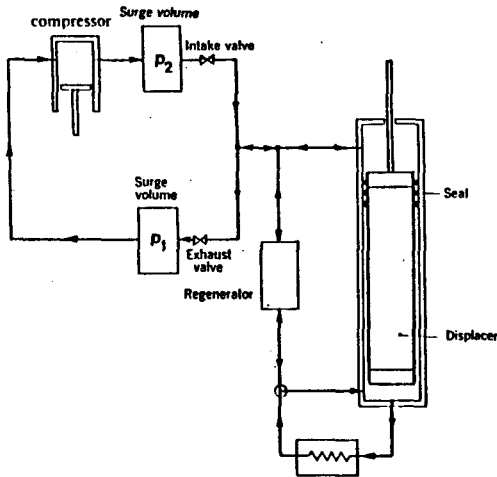


Fig. 2. The thermodynamically ideal Gifford-McMahon refrigerator

선도를 보여주고 있다. G-M 냉동기의 주요 부분은 압축기, 재생기(regenerator), 팽창기(displacer), 밸브, 증발기 등을 들 수 있으며 밸브의 조작에 의하여 일정한 온도 및 압력 사이클을 형성하며 작동한다. 과정 1-2은 displacer가 실린더 하단에 있는 상태에서 흡입 밸브가 열려 압축기에서 나온 고압의 가스가 시스템으로 들어간다. 과정 2-3은 흡입밸브가 계속 열린 상태에서 배출밸브는 닫히고 압축된 가스는 재생기를 통하여 온도가 떨어진

상태하에 실린더 하단으로 들어가며, 이 때 displacer은 실린더 상단으로 움직인다. 과정 3-4은 displacer가 실린더 하단에서 상단으로 이동됨에 따라 가스가 단열팽창하므로 압력 및 온도가 떨어진다. 이때 displacer가 실린더 상단에 위치하였을때 흡입밸브는 닫히고 배출밸브는 열린다. 과정 4-5-1은 displacer가 실린더 하단으로 움직임에 따라 저온 가스가 증발기에서 열을 흡수하고, 재생기에서 열교환을 한후, 상온 상압 상태하에 압축기로 되 돌아간다.

G-M 냉동기의 장점은 팽창기내의 이중 공간을 형성하여 누수를 방지하므로 밀봉(seal)에 어려움이 없으며, displacer와 밸브의 밀봉을 상온에서 사용하며, 재생기를 사용하기 때문에 가스의 불순물을 자아정제(self-cleaning)할 수 있으며, 재생기와 팽창기를 여러개 연결하여 순차적으로 원하는 온도까지 떨어뜨릴 수 있다.

2.3 Combined simple Joule-Thomson refrigerator and Gifford-McMahon refrigerator

4.2K 근처에서 작동하는 냉동기의 형태로는 Cascade Joule-Thomson 냉동기,¹⁾ Reciprocating Brayton/Joule-Thomson 냉동기,²⁾ Gifford-McMahon/Joule-Thomson 냉동기³⁾ 등을 들 수 있다. 이들 냉동기중에서 소형 냉동기에는 위에서 기술한 Joule-Thomson 냉동기와 Gifford-McMahon 냉동기의 혼합형인 Joule-Thomson/Gifford-McMahon 형태의 극저온 냉동기가 많이 사용되고 있다. Joule-Thomson/Gifford-McMahon 냉동기의 장점은 다음과 같다.⁴⁾

- 1) 시스템의 내구성이 좋고, 유지비용이 저렴하다.
- 2) 비교적 낮은 압력하에서 작동하므로 소형의 압축기를 사용할 수 있다.
- 3) 사이클이 간단하며 시스템의 재현성이 좋다.

그림 3은 Joule-Thomson/Gifford-McMa-

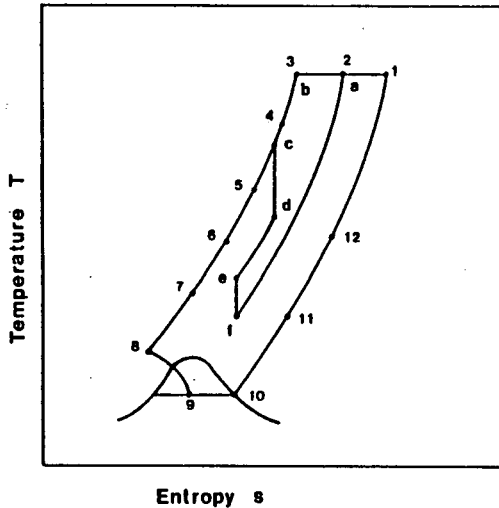
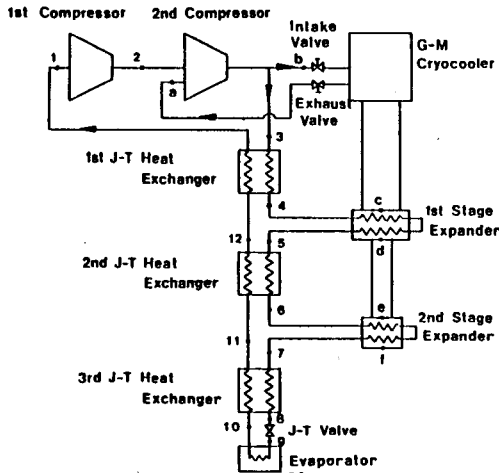


Fig. 3. The combined thermodynamically ideal Joule-Thomson refrigerator and Gifford-McMahon refrigerator

본 냉동기의 개략도 및 이상적인 T-S 선도를 보여주고 있다. 본 냉동기의 주요 부분은 2대의 압축기, 재생기, 팽창기, J-T 열교환기, J-T 밸브, 증발기 등으로 구성되어 있다. 전과정을 살펴보면 J-T 순환은 1단 및 2단 압축기에서 압축된 가스가 1단, 2단, 3단의 J-T 열교환기 및 G-M 냉동기의 열교환기를 통하여 온도를 떨어뜨린 후, J-T 밸브를 통하여 기체 헬륨이 이상(two phase) 상태로 전환된다. 증발기에서 열을 흡수한 액체 헬륨의 일부가 기체화되어 열교환기를 통하여

1단 압축기로 되돌아간다.

G-M 순환은 2단 압축기에서 압축된 가스가 1단, 2단 팽창기를 통하여 단열팽창한 후 J-T 열교환기와 열교환후 2단 압축기로 되돌아간다.

그림 4는 현재 국내에서 시판되고 있는 Cryosystems Inc.사의 Model No: LTS-3C-4.2의 개략도를 보여주고 있으며, 최저온도 4.2 K에서 용량은 3 W이다. 개략도는 그림 3과 거의 동일하며 압축기의 작동원리를 좀 더 자세히 보여주고 있다.

2.4 헬륨(He)

헬륨은 지상에서 비점이 가장 낮은 영구가스로서 헬륨 4와 헬륨 3로 분류한다. 일반적으로 헬륨가스가 함유 헬륨 4를 가르키며 이중 헬륨 3은 $1.3 \times 10^{-4} \%$ 를 차지하고 있다. He는 무색 무취이며, 비점은 4.212 K, 밀도는 124.8 kg/cm^3 으로 물의 1/8, 증발열은 20.90 KJ/kg 으로 물의 1/110이며, 상압에서 응고될 수 없으며 응고하기 위하여 0K, 24.97 기압상태가 되어야만 한다.

헬륨가스는 지상에서 비점이 가장 낮기 때문에 액체로 전환시키기가 다른 가스보다 어렵다. 보통가스(질소가스의 비점이상)의 상전위온도가 상온이므로 냉각이 용이하지만 특수가스(네온가스의 비점이하)는 상전위온도가 상온 이하이므로 온도를 떨어뜨리기 위해서는 에너기가 필요하다.

표 1은 냉동공학에서 사용되는 여러 냉매에 상대치들을 보여주고 있다.

3. 극저온 냉동기의 기본설계

각각의 Joule-Thomson 냉동기나 Gifford-McMahon 냉동기로는 원하는 온도 4 K 이하를 얻기가 불가능하기 때문에 혼합형인 Joule-Thomson/Gifford-McMahon 형태를 선택하였다. 그림 4에서 보는바와 같이 주된 시스템은 J-T 순환이며 에너기로는 G-M 순환을 이용한다. 구성요소는 J-T 순환에 압축기, J-T

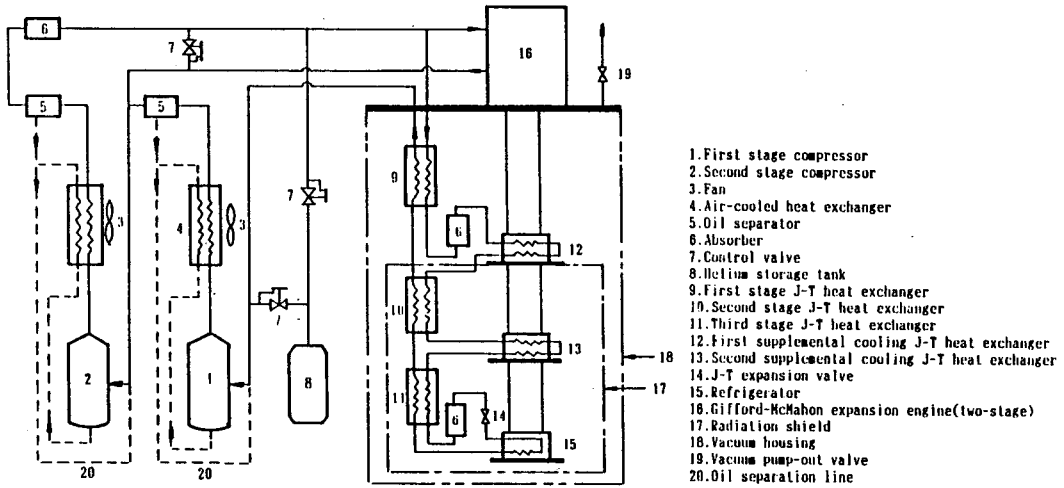


Fig. 4. The combined Joule-Thomson refrigerator and Gifford-McMahon refrigerator (RMC Cryosystems Inc., Model No: LTS-3 C-4.2)

Table 1. Some physical properties of cryogenic refrigerants

Properties Refrigerant	Boiling Point (K)	Critical Point		Triple Point		Max. inversion Temp.(K)	Density (kg/m ³)	Viscosity (KJ/kg -K)	Latent heat (KJ/kg)
		Temp. (K)	Pressure (atm)	Temp. (K)	Pressure (atm)				
Helium 3	3.19	3.32	1.15	—	—	—	58.9	4.61	8.49
Helium 4	4.214	5.20	2.26	—	—	45	124.8	4.48	20.90
Hydrogen	20.27	33.2	12.98	13.9	0.0711	205	10.79	9.68	443
Neon	27.09	44.4	26.2	24.54	0.427	250	1.206	1.83	85.9
Nitrogen	77.36	126.1	33.5	63.2	0.127	621	807.3	2.05	199.3
Air	78.8	133	38.7	—	—	603	874	1.96	205
Flourine	85.24	144.0	55.0	53.5	0.00218	—	1.507	1.54	166.3
Argon	87.28	150.7	48.3	83.8	0.679	722	1.394	1.136	161.9
Oxygen	90.18	154.6	50.1	54.4	0.0015	761	1.141	1.695	213
Methane	111.7	190.7	45.8	88.7	0.099	939	424.1	3.461	511.5

열교환기, J-T 밸브로 구성되었으며, G-M 순환은 압축기, G-M 열교환기, 팽창엔진으로 구성되었다. 냉매로는 J-T 순환에 헬륨, G-M 순환에 헬륨이나 수소를 사용할 수 있으며, 그림 4에서는 G-M 순환에도 헬륨을 사용하였다.

3.1 J-T 순환

J-T 순환은 J-T 열교환기(recuperative heat exchanger type)와 J-T 밸브로 구성되

어 있다. 극저온 열교환기는 일반 열교환기보다 효율이 월등히 좋아야 한다. 왜냐하면 일반적으로 상업용 열교환기는 효율이 80% 이상일때 이상적인 열교환기로 받아들여지지만, 극저온 열교환기는 효율이 90% 이상이어야만 열교환기로서 제성능을 발휘할 수 있다. 극저온 열교환기의 형태로는 관형(tubular type) 핀이 달린 판형(plate-fin type), 다공판형(perforated plate type) 등이 있는데, 관형 열교환기는 다양한 금속을 사용할 수 있으며,

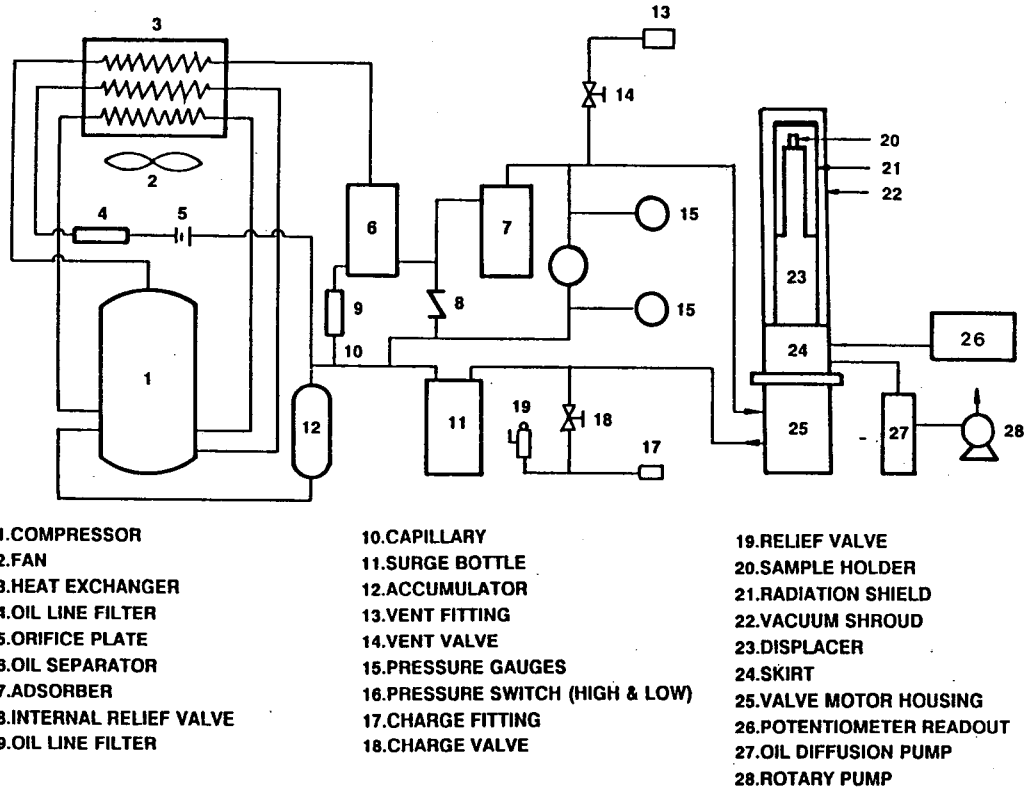


Fig. 5. Detailed flow diagram of Gifford McMahon refrigerator (Advanced Products Division Cryogenic, Inc., Model No: CSA-202)

강하고, 무게가 가볍고, 복잡한 장치에도 쉽게 조립할 수 있어 소형냉동기에 주로 사용되고 있다.

J-T 순환 열교환기 설계시 고려하여야 할 인자로는 유체의 흐름의 불균형 분배 (maldistribution), 축방향 열전도 (axial heat conduction), 관중심의 압력강하 (core pressure drop), 마찰손실 등이 있다. 4K에서 작동하는 소형냉동기는 효율이 좋은 핀이 달린 이중관형 (finned double tube) 열교환기가 많이 쓰이고 있다.⁴⁾ J-T 밸브의 형태로는 fixed orifice type, regulating flow rate type, bellow type 등이 있으나 제작하기 쉽고 간편한 fixed orifice type이 많이 쓰이고 있다.

3.2 G-M 순환

G-M 냉동기는 J-T 순환의 예냉기로 사용되고 있으며, 그림 4에서 G-M 냉동기는 2

단 팽창기 (two stage regenerative expander) 로 구성되어 있으며, 1단에서 77K, 2단에서 15K 근처까지 온도가 내려간다. Radiation shield 내에서는 77K를 유지하도록 설계되어 있다. 실제 G-M 냉동기는 열교환기로 재생기를 사용하므로 6K 이하의 온도를 얻을 수 없다. 왜냐하면 15K 이하의 온도가 되면 재생기의 재질 (matrix)의 비열이 급격히 떨어지므로 온도를 더 내릴 수 없게 되기 때문이다. 그림 4의 G-M 냉동기는 displacer에 rod가 달려있어 rod가 모터에 의해 상하운동을 함에 따라 가스의 팽창에 의해 온도가 내려간다. 재질로는 실린더는 stainless steel, displacer은 perspex, connecting cup은 copper, 1단 displacer seal은 neoprene O-ring, 2단 displacer seal은 roulon seal, 1단 재생기는 청동 망사체, 2단 재생기는 0.2mm 납구슬이 사용되었다. 설계시 고려되어야 할

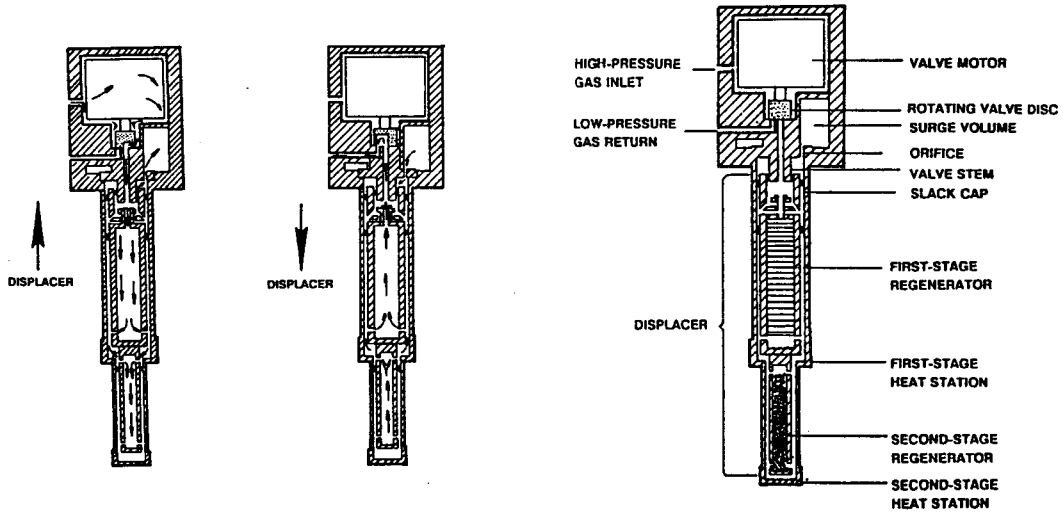


Fig. 6. Diagram of Expander Process of Gifford-McMahon refrigerator
(Advanced Products Division Cryogenic, Inc., Model No: CSA-202)

G-M 냉동기의 열손실 항들은 아래와 같다.^{5,6,7)}

1. 재생기의 비효율에 의한 손실
2. 비팽창(이론팽창-실제팽창)에 의한 손실
3. 압력손실에 의한 손실
4. 가스의 비 이상적인 특성에 의한 손실
5. 재생기의 공극에 의한 손실
6. displacer의 상하운동에 따른 실린더와의 열구배에 의한 손실
7. "O-ring" 밀봉에서 가스 누출에 의한 손실
8. 전도에 의한 손실
9. 복사열에 의한 손실
10. 냉각부에서 비 이상적인 열전도에 의한 손실

그림 5와 그림 6은 APD (Advanced Products Division) Cryogenic, Inc. 사 Model No: CSA-202의 흐름도 및 팽창기의 개략도를 보여주고 있다. 헬륨을 냉매로 한 Gifford-McMahon 극저온 냉동기(fluidic driven free displacer type)로 최저온도 15 K에 용량은 1 W이다. APD 모델은 유체의 작동에 의하여 displacer가 작동하나, 그림 4에서 설명한 모델은 모터에 연결된 rod에 의하여 displacer가 작동한다. 그러나 두 모델의 기본원

리는 같다.

그림 4의 모델(3 W at 4.2 K)과 그림 5의 모델(1 W at 15 K)은 현재 국내에서 시판되고 있으며, 가격은 각각 6 만불과 2 만불 정도가 된다.

4. 응용분야

극저온 기술은 최첨단 산업기술 및 우주, 국방산업 등 여러 분야에 걸쳐 응용되고 있으며 현재 상당한 분야에서 연구개발 단계를 지나 실용화되고 있다. 표 2은 극저온 기술의 응용 분야를 보여주고 있다.

5. 결 론

최첨단 과학의 기술축척이 절실히 요구되는 우리나라에서 극저온 냉동기의 적극적인 연구개발은 중요한 당면과제라 생각된다. 본 연구는 과거 특정과제로서 극한기술의 극저온 분야에 속하며 3년간(1988-1990)에 걸쳐 수행될 예정으로, 소형 극저온 냉동기를 설계, 제작, 개발하여 여러 소자 개발에 사용할 예정이다.

Table 2. 극저온 기술 응용분야

	응 용 분 야
1. 초전도자석	<ul style="list-style-type: none"> - 핵융합로, MHD 발전 - Fusion system, Magnetohydrodynamic power system - Linear accelerators (선형가속장치), 입자가속기 - Magnetic levitation rapid transit systems (자기부상열차) - Magnetic high speed ship propulsion system (자기선박 고속추진) - 전력저장 - NMR - CT (핵자기공명 단층촬영)
2. 초전도기기	<ul style="list-style-type: none"> - 초전도 변압기 - " 변속기 - " 모 타 - " 발전기
3. 조셉슨소자	<ul style="list-style-type: none"> - SQUID(초전도 양자간섭장치) - Masers (분자증폭기) <ul style="list-style-type: none"> o Missile detectors (미사일 탐지기) o Nuclear submarine detectors (핵잠수함 탐지기) o Radio astronomy (전파 천문학) o Space communication system (우주통신 시스템) - Superconducting amplifier (초전도 증폭기) - Computer 소자
4. 기 타	<ul style="list-style-type: none"> - 전력송전 - 항공, 우주선, 로켓트 연료(액체수소, 산소) - Bubble chamber - Cryopump - Zero-friction lubricant - Space chamber and high-vacuum technology (초고진공) - 저온생물학, 의학 - 식품냉동 - Recycling materials (재생타이어) - 가스-액화분리 <ul style="list-style-type: none"> o LNG o 암모니아 o 희소가스 o D₂

참 고 문 헌

1. P.K. Lashmet and J.M. Geist, "A Closed Cycle Helium Refrigerator," Adv. in

Cryog. Eng., Vol.8, pp.199-205, 1963.

2. K. Zeitz and B.K. Woolfenden, "A Closed-cycle Helium Refrigerator for 2.5 K," Adv. in Cryog. Eng., Vol.8, pp.206-212,

- 1963.
3. T.E. Hoffman, "Reliable, Continuous, Closed-circuit 4 K Refrigerator for a Maser Application," *Adv. in Cryog. Eng.*, Vol.8, pp.213-220, 1963.
 4. Ralph C. Longworth, "4 K Gifford-McMahon/Joule-Thomson Cycle Refrigerator," *Adv. in Cryog. Eng.*, Vol.33, pp. 689-698, 1987.
 5. M. Thirumaleshwar and S.V. Subramanyam, "Gifford-McMahon Cycle-a Theoretical Analysis," *Cryogenics*, Vol.26, pp. 177-188, March, 1986.
 6. M. Thirumaleshwar and S.V. Subramanyam, "Heat Balance of Single Stage Gifford-McMahon Cycle Cryorefrigerator," *Cryogenics*, Vol.26, pp.189-195, March, 1986.
 7. R.A. Ackermann and W.E. Gifford, "A Heat-balance Analysis of a Gifford-McMahon Cryorefrigerator," *Adv. in Cryog. Eng.*, Vol.16, pp.221-229, 1970.