

[요약문]

줄톰슨 냉동기는 스테링 냉동기, GM 냉동기, 스테링형 및 GM형 맥동관 냉동기 등 기계식 극저온냉동기에 비해 초소형의 단순한 구조, 수 초의 급속한 냉각 특성을 장점으로 중대형의 가스액화사이클 뿐만 아니라 적외선검출기의 급속냉각, 저온수술 등 다양한 분야에서 널리 사용되어지고 있다. 일반적으로 100 K 이하의 작동온도 및 수 초 수준의 빠른 냉각을 요구하는 적외선검출기의 냉각을 위해서는 수 백기압 이상 고압의 질소 및 아르곤 가스를 사용하는 줄톰슨 냉동기가 주로 사용되고 있다. 줄톰슨 냉동기는 핀-관(fin-tube) 형태의 열교환기와 열교환기의 구조적 기반을 제공하는 맨드렐(mandrel), 줄톰슨 노즐 등으로 구성되며, 열교환기의 열전달 성능 및 유량조절기구의 특성은 냉동기 저온부의 냉각온도, 냉각시간 및 운전시간에 큰 영향을 미친다.

1. 서론

급속한 정보통신 및 전자산업의 발전에 힘입어 소형의 전자부품 및 센서의 보급이 증대되고 있으며, CMOS(Complementary Metal-oxide-Semiconductor), GaAs 등의 반도체 소자들은 저온에서 작동될 때 열잡음(thermal noise)의 감소, 용량증가, 민감도의 증가 등 성능이 향상된다. 예로 현재 컴퓨터의 핵심부품인 CPU의 경우 액체질소 온도(77 K) 또는 액체헬륨 온도(4.2 K)에서 상온의 약 100배의 처리속도를 나타낸다.

120 K(-153 °C) 이하의 극저온의 온도생성 및 유지를 목적으로 하는 극저온냉동기는 사용하는 열교환기의 형태에 따라 복열식(recuperative type)과 재열식(regenerative type)으로 분류할 수 있으며, 대표적인 복열식 극저온냉동기로는 줄톰슨(Joule-Thomson) 냉동기, 재열식 극저온냉동기로는 스테링(Stirling) 냉동기, 맥동관(Pulse-tube) 냉동기, G-M(Gifford-McMahon) 냉동기가 있다.^[1-4]

줄톰슨 냉동기는 표 1에 나타낸 바와 같이 스테링 냉동기, GM 냉동기, 스테링형 및 GM형 맥동관 냉동기 등의 기계식 극저온냉동기에 비해 소형일 뿐만 아니라 단순한 구조, 급속한 냉각 특성을 장점으로 중대형의 액화사이클 뿐만 아니라 적외선검출기(infrared detector)의 급속냉각, 종양제거를 위한 저온수술 등 다양한 분야에서 널리 사용되어지고 있다.

줄톰슨 냉동기에서 냉각은 줄톰슨 노즐을 통과하는 고압의 가스가 등엔탈피 교축과정을 통해 팽창하면서 발생하는 강온효과(Joule-Thomson effect)에 의해 생성되며, 대항류 열교환기를 통해 교축 전/후 가스간의 열교환을 수행하여, 냉각의 효과를 증폭하여 120 K 이하의 극저온의 온도에 도달할 수 있으며, G-M 냉동기의 경우 4~15 K, 스테링 냉동기가 50~100 K의 작동온도범위를 가지는 반면 줄톰슨 냉동기는 그림 1에 나타낸 바와 같이 수소(H₂), 질소(N₂), 아르곤(Ar) 등 사용냉매에 따라 다양한 온도범위에 대해 적용 가능한 장점이 있다.

반면 고압 가스용기를 사용하는 줄톰슨 냉동기는 배터리 등의 전원을 사용하는 스테링 냉동기 및 맥동관 냉동기에 비해 상대적으로 짧은 시간(냉각유지시간)의 운용이 불가피하다.



표 1. 극저온냉동기의 특징

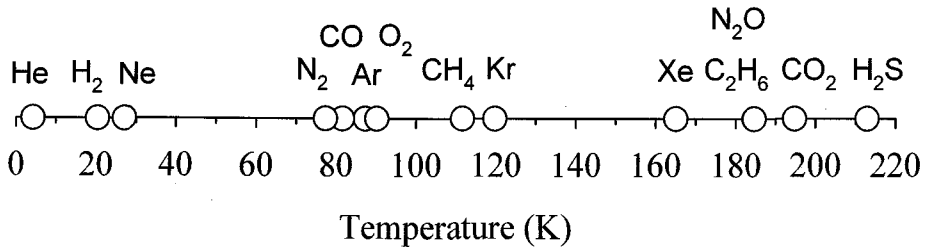
냉각기 형태		장점	단점	주요 응용분야
줄뜸슨 냉동기		<ul style="list-style-type: none"> • 급속냉각 (수초) • 저소음/저진동 • 초소형/단순구조 • 신뢰성/가격 	<ul style="list-style-type: none"> • 고압가스 용기/압축기 필요 • 짧은 냉각 유지시간 	가스액화/ 저온수술/ 분석기기/ 유도무기
스터링 냉동기	회전 압축기	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각유지시간 • 소형, 경량 • 저전력 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각시간(수분) • 수명/소음/진동 	휴대·이동용 열영상장비/ 초전도전력 기기냉각
	선형 압축기	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각유지시간 • 소형 • 수명/신뢰성 (수만시간) 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각시간(수분) • 진동/효율 	열영상장비
맥동관 냉동기		<ul style="list-style-type: none"> • 냉각유지시간 • 수명/신뢰성 (수만시간) • 저진동 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각시간(수분) • 효율 	우주용 열상장비/저진동 센서냉각/초전도 전력 기기냉각
G-M 냉동기		<ul style="list-style-type: none"> • 큰 냉동능력 • 냉각유지시간 • 수명 (수만시간) 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각시간 (수십분) • 큰 설치공간 • 효율 	초전도전력 기기냉각/ Cryopump

수 백 기압 이상 고압의 질소(끓는점 77.3 K) 및 아르곤(끓는점 87.3 K) 가스를 사용하는 줄뜸슨 냉동기는 일반적으로 100 K 이하의 작동온도 및 수 초 내에 급속한 냉각을 요구하는 적외선검출기의 냉각^[1]에 사용되고, 아르곤, R134A, R32 등 다양한 냉매를 혼합한 혼합냉매 줄뜸슨 냉동기는 그 보다 높은 온도영역을 대상으로 하는 저온수술용^[5,6]으로 사용되고 있다. 또한 증발온도가 낮고 역전온도(inversion temperature)가 낮은 수소, 헬륨(He) 등의 가스를 G-M 냉동기, 스테링 냉동기 등의 극저온냉동기에 의해 예냉시켜, 저온에서 극저온냉동기의 냉각성능을 향상시켜 대용량의 초전도 응용기기를 냉각하는 목적으로 사용되기도 한다.

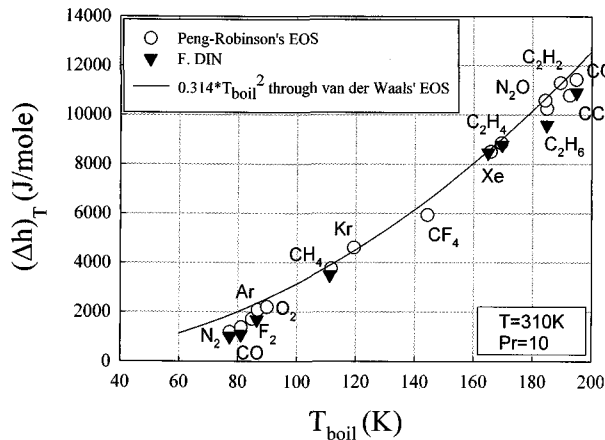
2. 적외선검출기 냉각용 줄뜸슨 냉동기

Insb, HgCdTe 등의 소자로 구성되는 적외선검출기는 100 K 이하의 극저온 냉각을 통해 빠른 반응시간과 높은 검출도를 발휘^[9]할 수 있으며, 효과적으로 극저온을 생성, 유지하기 위해 극저온냉동기의 저온부 또는 내부경통에 부착된다.

그림 2는 줄뜸슨 냉동기의 작동유체가 질소가스인 경우에 대한 정상상태에서 이상적인 과정의 온도-엔트로피 선도로, 상온/고압(293 K / 400 bar)의 상태 2로 줄뜸슨 냉동기로 공급된 질소가스는 대항류형 열교환기 내부유로를 통과(2-3, 등압과정)하면서 배출되는 가스와의 열 교환을 통해 냉각되어 상태 3으로 된 후, 노즐을 통과하면서 급격한 팽창을 통해 상태 4의 저온/저압(80 K 이하/ 1 atm) 상태의 이상유체 상태로 된다(3-4, 등엔탈피 과정). 액화된 액체가 주위의 열을 흡수하면서 기화되어 상태 5로 열교환기로 유입되고, 고온/고압의 질소가스와 열 교환을 통



(a) 가스의 끓는점



(b) 교축과정을 통한 강온효과

그림 1. 가스에 따른 줄뜸순냉동의 적용온도 및 강온효과^[6]

해 가열되어 대기로 방출된다(5-1, 등압과정). 이때 저온부의 냉각은 4-5 과정을 통해 수행되며, 저온부의 냉동능력은 액화된 작동유체의 증발잠열 및 유량에 의해 결정된다. 또한 열교환기의 열교환 및 압력강하 특성에 따라 상태 3의 온도 및 압력의 변화가 발생하여 팽창 후 발생하는 상태 4의 건도(quality)가 변화하게 되어 냉동기의 냉동능력에 큰 영향을 미치게 된다.

줄뜸순 냉동기는 그림 3에 나타낸 바와 같은 고압의 가스를 공급하는 가스용기 또는 압축기, 불순물의 유입을 억제하기 위한 가스필터와 핀-관(fin-tube) 형태의 열교환기와 열교환기의 구조적 기반을 제공하는 맨드렐(mandrel)와 스페이서(spacer), 줄뜸순 노즐 등으로 구성되며, 적외선검출기 냉각용 줄뜸순 냉동기는 통상 내경 5~10 mm인 듀워(Dewar, 진공용기)의 내부 경통에 삽입되어 사용되며, 높은 팽창 전/후의 압력비로 인해 주로 가스는 고압으로 압축된 가스용기로부터 공급된다. 가스용기로부터 공급된 고압가스는 열교환기 관 내부를 통해 맨드렐 주위를 선회하면서 열교환하여 온도가 낮아지며, 줄뜸순 노즐로 유입되어 교축과정을 통해 급격한 압력변화 및 강온과정이 발생된다. 열교환기를 통해 충분히 강온된 가스의 교축과정을 통해 액체가 발생하며, 주위의 열유입으로 인해 기화된 가스는 맨드렐과 듀워의 내부경통 사이의 유로에서 핀-관 열교환기의 관 외부로 진행하면서 관 내부의 가스와 열전달을 수행한 후 외부로 배출된다. 표 2는 일반적인 줄뜸순 냉동기의 구성요소의 사양을 나타내고 있다.

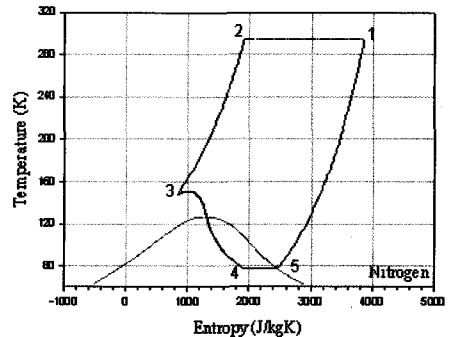


그림 2. 줄뜸순 냉동기의 온도-엔트로피 선도

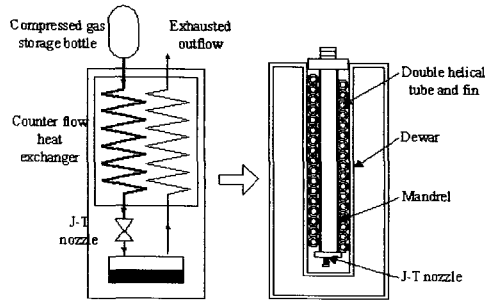


그림 3. 줄뜸سن 냉동기의 개략도

표 2. 일반적인 줄뜸سن 냉동기 구성요소의 사양

구성요소	사양	재질
열교환기	Giaque - Hampson coil tube transverse flow recuperative heat exchanger	-
Tube	O.D. : 0.5 ~ 1.0 mm / I.D. : 0.3 ~ 0.7 mm	cupro-nickel
Fins	(0.25 ~ 0.50) ~ (0.05 ~ 0.15) mm	copper
Mandrel	thin-walled tube	stainless steel / plastic rod
Spacer	thread	cotton / plastic
Dewar	thin-walled tube (I.D. : 5 ~ 10 mm)	glass / metal

소형 줄뜸سن 냉동기는 유량조절기구의 유무에 따라 고정오리피스형(fixed orifice type) 및 유량자동조절형(demand flow type)으로 분류되며, 고정오리피스형 줄뜸سن 냉동기는 제작 및 조장이 간편하고 저온부의 급속한 냉각이 가능하나 냉각부하에 대응하는 적절한 가스유량으로의 조절이 불가능한 단점을 지니고 있으며, 벨로즈(bellows), 이중금속, 형상기억합금 등을 이용^[7]하여 냉각이 완료 된 후 필요이상의 액체의 생성을 억제할 수 있는 유량자동조절형 줄뜸سن 냉동기는, 구조가 복잡하며 유지보수가 힘든 단점을 지니고 있으나, 고정오리피스형에 비해 장시간 운전할 수 있는 장점을 지니고 있다^[2].

줄뜸سن 냉동기의 냉동능력은 냉동기로 공급되는 가스의 압력 및 온도에 따라 크게 변화하며, 그림 4는 압력에 따른 질소 및 아르곤가스의 냉동능력을 나타낸다. 질소의 경우 약 40 MPa의 압력 일 때 최대의 냉동능력을 나타내며, 아르곤의 경우 약 55 MPa의 압력에서 최대의 냉동능력을 나타내어 줄뜸سن 냉동기에서 급속한 초기냉각을 위해서는 고압의 가스가 요구되며, 아르곤가스가 질소에 비해 높은 냉동능력을 나타내어 급속냉각에 적합한 가스임을 알 수 있다.

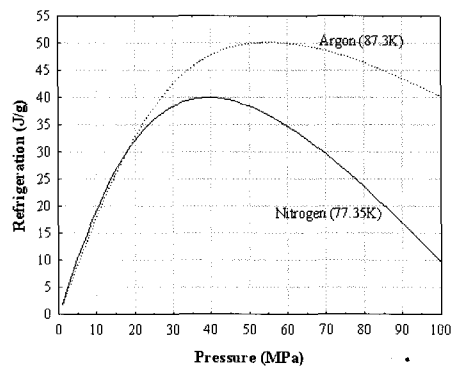


그림 4. 가스의 압력에 따른 줄뜸سن 냉동기의 이상적인 냉동능력

2.1 열교환기

줄뜸سن 냉동기의 열교환기는 소형의 열교환기로 최대한의 열교환을 수행하기 위해 일반적으로 외경 0.5~1.0 mm의 백동(cupro-nikel) 관에 열전도도가 큰 재질의 원형 또는 사각단면의 핀을 부착한 후, 맨드릴 위에 나선형으로 감아 열교환기의 길이를 최소화하면서 열전달면적을 증가시키는 Giaque - Hampson 구조의 열교환기가 많이 사용

되며, 보다 큰 열교환면적의 증가를 위해 여러 개의 관을 사용하기도 한다. 최근에는 리소그래피(lithography)와 식각(etching) 기술을 활용한 MEMS 열교환기가 개발^{8,9)}되어 일부 사용되기도 하나, 급속냉각을 요구하는 적외선검출기의 냉각의 경우 수 백 기압의 고압 가스 사용으로 인한 구조안정성의 문제로 인해 활용이 제한되고 있다.

수 초 수준의 급속한 초기냉각을 위해서는 수십 W 이상의 냉동능력이 요구되며, 냉각완료 후 안정적인 극저온의 온도를 유지하기 위해서는 열교환기의 성능이 보장되어야 한다. 그림 5는 열교환기의 NTU(Number of Transfer Unit, 전달단위수)에 따른 질소가스를 사용하는 이상적인 냉동기의 냉동능력을 나타내고 있다. 동일한 가스유량에서 열교환기의 크기의 증가는 열교환기의 열전달면적의 증가를 의미하며, 공급되는 가스의 압력에 따라 냉동능력의 차이가 발생하나 최적의 냉동능력을 얻기 위해서는 적절한 열전달면적의 확보가 요구됨을 알 수 있다.^[10,11]

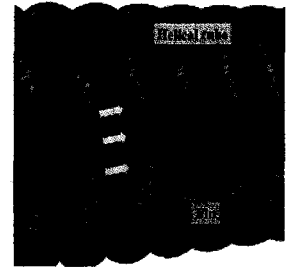


그림 5. 줄튬슨 냉동기의 열교환기 구조

그림 6은 열교환기의 핀-관의 감김수에 따른 냉동기의 특성변화를 나타낸 압력-엔탈피선도로, 감김수의 증가에 따라 발생하는 열전달특성의 향상으로 열교환기 출구에서의 고압가스의 온도가 낮아지고, 이에 따라 교축과정 후 발생하는 액체의 건도가 감소함을 알 수 있다. 또한 열교환기의 감김수가 작은 경우 교축과정 후 액체가 발생하지 않을 수 있음을 제시하고 있다.

또한 열교환기의 열전달 성능 저하는 냉동기 저온부의 냉각온도 상승, 냉각시간의 증가 및 운전시간의 감소가 유발되기 때문에 몇몇 압력강하 측면에서 최적성능의 열교환기가 요구된다.

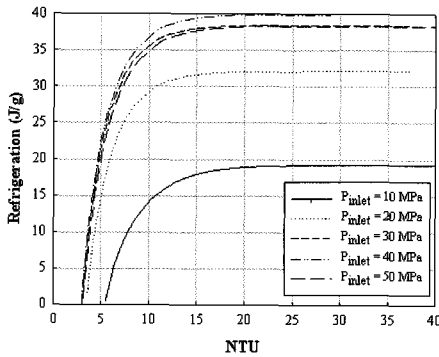


그림 6. 열교환기의 전달단위수에 따른 냉동능력

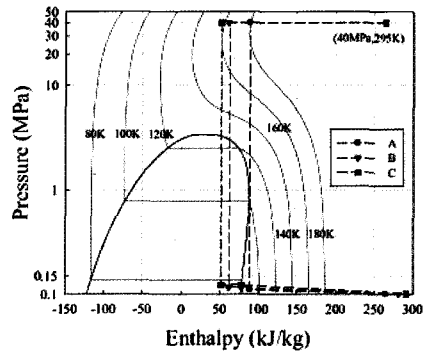


그림 7. 열교환기의 감김수에 따른 냉동기의 압력-엔탈피선도 (감김수 A:12, B:18, C:24)^[12]

2.2 유량조절기구

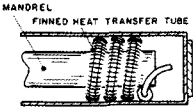

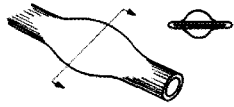

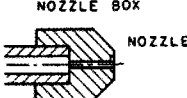
유량조절기구는 교축과정을 발생하는 줄튬슨 노즐과 노즐의 유동면적을 제어하는 기구로 구성된다. 급격한 압력 변화를 유발하는 교축과정의 발생을 위해 표 3과 같은 다양한 형태의 기구가 개발, 사용되어져 왔으나 최근에는 모세관과 노즐이 주로 사용되어지고 있다. 또한 노즐의 유동면적의 제어를 위해 니들(needle)이 사용되고 있으며, 니들은 그림 7의 유량자동조절형 줄튬슨 냉동기에서 가스유량을 제어하기 위해서 뿐만 아니라, 냉각이 완료된 후 과도한 가스소모를 억제하기 위해 두 개의 오리피스를 사용하는 고정오리피스형 줄튬슨 냉동기에서도 사용되고 있다. 이때 니들을 이용한 노즐의 유동면적(유량)의 제어는 고압으로 가스가 충전된 벨로우즈, 이중금속의 열팽창, 형상기억 합금 등이 사용된다.

노즐을 통과하는 가스유량의 제어는 냉동기 저온부에서 발생하는 액체로부터의 열전달을 통해 벨로우즈에 충전된 가스의 부피 및 압력변화 또는 금속소재의 열수축이 발생하게 되고, 이들과 결합된 구조물을 통해 니들의 위치이



등을 발생시켜 노즐의 유동면적을 변화시킴으로써 가능하게 된다. 유량자동조절형 줄뜸스 냉동기의 경우 저온부에서 생성된 액체로 인해 노즐의 유동면적의 감소가 발생하고, 저온부의 온도가 상승하게 되면 노즐의 유동면적의 증가를 통해 가스의 유량을 증가시켜 냉각효과를 증가시키는 운전을 지속적으로 수행하여, 냉각완료 후 가스소모량을 최소화시킬 수 있게 된다.^[13, 14]

표 3. 줄뜸스 노즐의 형태^[2]

Type of nozzles	Configuration
Open end	
Fishtail	
Flattened tube	
Wire insert	
Nozzle box at tube end	

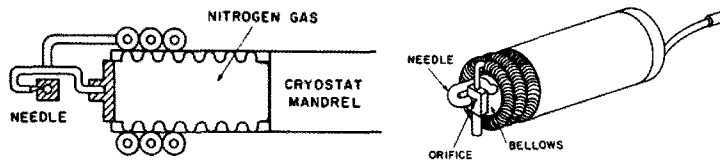


그림 8. 유량자동조절형 줄뜸스 냉동기의 구조^[2]

그림 8은 아르곤을 작동유체로 사용하는 고정오리피스 및 유량자동조절형 줄뜸스 냉동기의 냉각특성을 나타내고 있다. 운전초기의 저온부의 온도특성은 노즐의 형식에 관계없이 유사하게 나타나나 냉각이 완료된 이후 정상상태 온도 및 가스유량에서 큰 차이를 나타내고 있다. 고정오리피스형 냉동기의 경우 가스유량을 제어하는 기구가 없으므로 인해 냉각이 완료된 이후에도 지속적으로 가스유량이 증가하고 이로 인해 저온부의 온도가 높게 나타난다. 또한 냉각이 완료된 이후에는 매우 큰 가스소모량의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

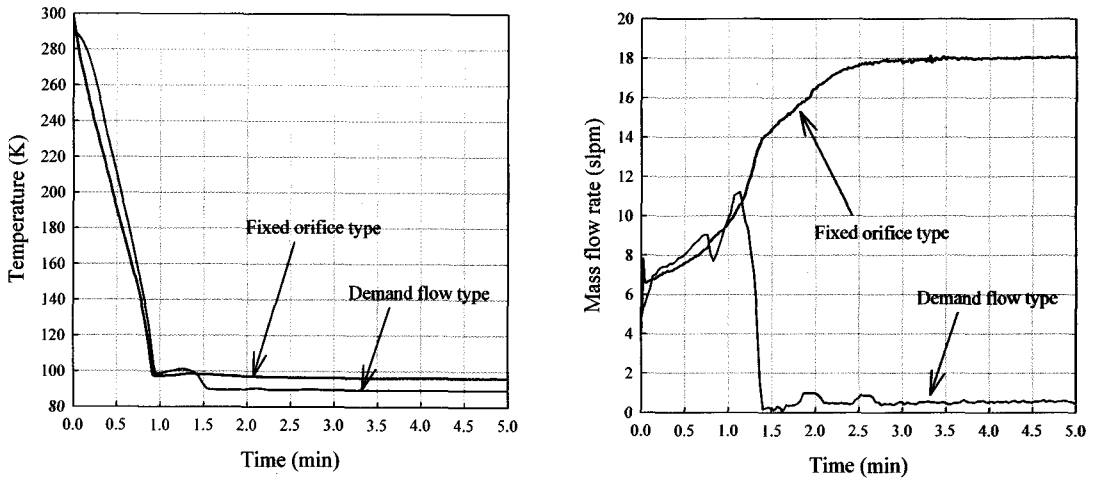


그림 9. 줄톰슨냉동기 강온특성

이와 같은 특성으로 인해 고정오리피스형 줄톰슨 냉동기의 경우 냉각초기 및 냉각완료 직후 생성된 많은 양의 액체를 통해 냉각을 수행하는 응용분야에 주로 사용되어 지고 있으며, 유량자동조절형의 경우 장시간의 운전시간을 요구하는 응용분야에 적합한 냉동기 형태이다.

3. 결 론

수 초 수준의 급속한 냉각을 장점으로 하는 줄톰슨 냉동기는 소형의 단순한 구조로 적외선검출기의 냉각, 저온 수술용으로 많이 사용되어지고 있다. 급속한 냉각성능의 확보와 소형화를 위해 높은 열전달 성능의 초소형의 열교환기의 설계/제작이 요구되며, 운용시간의 증대 및 온도안정화를 위해서는 유량조절기구의 도입이 요구된다. 국내에서도 관련 응용분야의 확대에 따라 지금까지 주로 유럽, 이스라엘, 미국 등의 해외 주요제조사로부터의 도입에 의존하고 있던 줄톰슨 냉동기에 대한 개발이 진행되고 있으며, 향후 지속적인 연구개발을 통해 다양한 형태의 줄톰슨 냉동기가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

❁ 참고 문헌

- [1] M. Donabedian, "Survey of Cryogenic Cooling Techniques", Air Force Report No. SMASO-TR-73-34, 1972
- [2] G. Walker, "Miniature Refrigerator for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, Oxford, 1989
- [3] M. Donabedian, "Spacecraft Thermal Control Handbook", The Aerospace Press, 2003
- [4] R. Radebaugh, "Cryocoolers: the state of the art and recent developments", J. of phys : Condens. Matter 21, 164219, 2009
- [5] B. Maytal and S. W. Van Sciver, "Characterization of coolants for Joule-Thomson cryocoolers", Proc. of the 6th Int. Cryocoolers Conference, Vol. 1, pp. 245-256, 1990



- [6] R. C. Longworth, "Consideration in applying open cycle JT cryostats to cryosurgery", Cryocoolers 11, pp. 783-792, 2002
- [7] G. E. Bonney, "Bi-material controlled demand flow Joule-Thomson coolers", Cryocoolers 7, pp. 1003-1011, 1993
- [8] R. L. Paugh, "New class of microminiature Joule-Thomson refrigerator and vacuum package", Cryogenics 30, pp. 1079-1083, 1990
- [9] L. G. Hewavitharana, "Design and Fabrication of a microscale Joule-Thomson refrigerator", Ph.D. Thesis, Louisiana Tech University, 2003
- [10] 홍용주, 김효봉, 박성제, 최영돈, "줄뜸스냉도기의 열교환기 성능에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회 논문지, 11권 1호, pp. 55-59, 2009
- [11] Y. J. Hong, S. J. Park and Y. D. Choi, "A Numerical Study on the Performance of the Miniature Joule-Thomson Refrigerator", Adv. in Cryogenic Eng, Vol. 36, pp. 979-984, 2010
- [12] Y. J. Hong, S. J. Park and Y. D. Choi, "Effect of Heat Exchanger Configuration on the Performance of Joule-Thomson Refrigerators", Cryocoolers 16, pp.455-462, 2011
- [13] S. B. Chien, L. T. Chen and F. C. Chou, "A study on the transient characteristics of a self-regulating Joule-Thomson cryocooler", Cryogenics 36, pp. 979-984, 1996
- [14] Y. J. Hong, S. J. Park, H. B. Kim and Y. D. Choi, "The cool-down characteristics of a miniature Joule-Thomson refrigerator," Cryogenics, Vol. 46, pp.391-395, 2006.



홍 용 주

- 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : yjhong@kimm.re.kr



고 준 석

- 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : jsko@kimm.re.kr



김 효 봉

- 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : hyobong@kimm.re.kr



박 성 제

- 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : sjpark@kimm.re.kr