

## 수소 Joule-Thomson 냉동기의 성능실험

### Performance test of Joule-Thomson cryocooler with H<sub>2</sub> gas

백 종 훈\*, 강 병 하\*, 홍 성 제\*, 장 호 명\*\*  
 J. H. Baik, B. H. Kang, S. J. Hong, H.-M. Chang

**Key words:** Hydrogen(수소), Cryocooler(극저온냉동기), Joule-Thomson refrigerator(Joule-Thomson 냉동기), Joule-Thomson valve(Joule-Thomson 밸브)

#### ABSTRACT

The Joule-Thomson cryocooler with H<sub>2</sub> gas has been developed. Cool-down characteristics and the cooling performance of a JT cryocooler have been investigated in detail. The JT cryocooler consists of JT expansion valve, heat exchanger, expansion chamber, compressed H<sub>2</sub> gas storage tank, LN<sub>2</sub> precooler, heater and a cryostat. The precooling process using both GN<sub>2</sub> and LN<sub>2</sub> was performed to cool down the inside components of cryocooler under the maximum inversion temperature of H<sub>2</sub>. The H<sub>2</sub> expansion experiments have been performed for 2-5MPa of H<sub>2</sub> pressure to evaluate steady state temperatures of the cryocooler. It is found that the steady state temperatures are decreased as the H<sub>2</sub> pressures are increased. The effects of cooling temperatures on the performance have been evaluated for various H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> pressures. It is seen that the cooling loads are increased, as the cooling temperature and operating pressure are increased.

#### 1. 서 론

액체상태의 수소는 저장용기의 무게를 포함한 단위질량 당 저장에너지의 측면에서 매우 높은 에너지 밀도를 가지며, 절대온도 20 K 부근의 낮은 온도로 인하여 열역학적으로도 그 가치와 효율성이 높게 평가되고 있다. 저장 및 수송이 용이하도록 액화된 수소는 이용분야가 매우 다양하여 각종 가스정제, 식품가공, 반도체, 군수, 의료분야, 연구용 등으로 많이 사용되고 있으며 수송차량의 연료 및 로켓추진체 연료로서의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 특히 최근에 많은 연구

가 활발히 진행되고 있는 고온초전도체의 전류도입선(current lead), 고온초전도체 시편, 고온초전도체를 이용한 초전도양자간섭장치(SQUID) 등의 냉각분야에서도 수소의 끓는점(n.b.p: normal boiling point)이 20.3 K이므로 극저온냉매로서의 적용가능성이 타진되고있다.<sup>(1)</sup>

기존의 저온초전도체의 냉각은 대부분 액체헬륨을 사용하여 4K 부근에서 수행되는 것이 대부분이었으나, 고온초전도체의 개발과 그 응용분야가 급속히 확산됨에 따라 대략 20-80 K 영역에서 수행되고 있으며, 수 W의 냉동능력이 요구되고 있다. 이러한 온도영역에서 냉동능력을 얻기 위하여 냉매로서 헬륨(n.b.p: 4.2 K), 수소, 네온(n.b.p: 27.1 K), 질소(n.b.p: 77.3 K) 등이 사용된다.<sup>(1)</sup> 헬륨을 작동유체로 하는 GM 냉동기

\* 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터

\*\* 홍익대학교 공과대학

(Gifford-McMahon refrigerator)는 작동온도 범위가 4 K-15 K인 영역이고, 맥동관 냉동기(pulse tube refrigerator)는 50-80 K인 영역에서 많이 사용되고 있으며, Stirling 냉동기, 질소와 탄화수소(hydrocarbon), 메탄, 에탄 등을 혼합하여 운전하는 혼합냉매 Joule-Thomson 냉동기(mixed refrigerant Joule-Thomson refrigerator), 일부 맥동관 냉동기 등은 80 K 이상인 상대적으로 고온영역에 주로 적용되고 있다. 그러나 대표적인 고온초전도체 물질인 BSCCO의 경우, 20-35 K 사이에서 전류밀도(전류/단면적)의 큰 손실없이 5-7 Tesla 정도의 자기장을 발생시킬 수 있다고 보고되고 있다<sup>(2)</sup>. 즉, 이는 20-35 K 영역이라는 특정온도범위에서 냉동능력을 갖는 냉각장치가 요구된다고 할 수 있으나, 헬륨을 냉매로 사용해서는 적절한 방법이 없기 때문에 극저온냉매로서 네온과 수소를 이용한 연구가 관심을 받고 있다.

고온초전도체의 냉각을 목적으로 하는 네온 액화사이클에 대한 연구는 과거 국외에서 GM 냉동기를 사용하여 네온을 액화하는 연구가 시도된 바가 있으며<sup>(3)</sup>, 최근에는 GM 냉동기를 예냉기로 사용하여 네온을 냉각시킨 후, Joule-Thomson 밸브(이하 JT 밸브)를 통과시켜 액체네온을 얻고자 하는 연구가 발표되었다.<sup>(4)</sup> 국내에서는 수소를 액화하기 위하여 GM 냉동기를 이용한 직접액화 방식 수소액화기에 대한 연구가 수행되어 소형 수소액화시스템용으로서의 적용가능성을 입증한 바 있다.<sup>(5)</sup> 네온은 불활성기체로 안전하나, 공기 중에 매우 미량만이 존재하여 고가인 단점이 있으나, 수소는 물을 전기분해 함으로써 손쉽게 얻을 수 있으며, 연소가 가능하므로 액화연료로서의 가치가 높고, 20 K 부근에서 냉동능력을 얻을 수 있는 극저온냉매로는 유일하다는 매우 중요한 장점이 있다. 이러한 측면에서 수소를 작동유체로 하는 냉각장치 및 수소액화기의 개발은 매우 중요하다고 할 수 있다.

극저온공학을 기반으로 하는 극저온냉매의 냉각 및 액화기술은 1940년대 이후 여러 분야에 걸쳐 발전해 왔으며, 이들은 공히 냉매의 압축, 방열, 열교환 및 팽창과정 등을 반복적으로 수행할 수 있는 사이클을 구성하여, 높은 에너지 상태의 작동유체를 낮은 에너지 상태로 변환시키는 것이다. 이러한 기능을 수행하는 기본적인 사이클로는 중·소형 액화/냉동사이클로 운용되고 있는

액체질소 예냉식 Linde-Hampson 사이클을 들 수 있다.<sup>(1)</sup> 액체질소 예냉식 Linde-Hampson 사이클은 압축기와 열교환기, JT밸브로 구성된 전형적인 극저온용 액화/냉동사이클이며, 최대역전온도가 네온은 250 K, 수소는 205 K이기 때문에 JT 팽창을 통하여 액화/냉각하기 위하여 액체질소를 사용하여 예냉하고 있다. 액체질소 예냉식 Linde-Hampson 사이클의 장점으로는 JT밸브를 사용하므로 팽창기를 사용하는 Claude 사이클에 비하여 구조가 매우 간단하고 제작이 용이한 장점이 있으며, 단점으로는 JT밸브의 유로단면적이 매우 작으므로 온도가 낮아짐에 따라 작동유체 내에 존재하는 불순물이 얼게 되어 유로를 차단하는 막힘(clogging)현상이 발생할 수 있다.<sup>(1)</sup>

JT밸브를 이용한 극저온냉매의 냉동사이클에 대한 연구는 세계적으로 수 십 년간 많은 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 중·대형 액화사이클 이외에도 소형, 또는 초소형으로 제작된 JT밸브를 이용하여 적외선 감지장치(infrared detector), 열추적카메라(thermal camera), 미사일 유도장치(missile homing head and guidance system) 부품의 국소냉각이나 극저온수술용으로 사용하기 위한 연구가 국외에서 진행되고 있다.<sup>(6,7)</sup> 또한 매우 작은 유로를 필요로 하는 JT밸브의 특성으로 인하여, 온도가 낮아짐에 따라 막힘(clogging)현상을 제거하기 위한 노력이 진행되고 있다. 일례로 JT밸브의 노즐부분을 요철모양으로 제작하여 막힘현상을 제거하고자하는 연구결과가 발표되었다.<sup>(8)</sup>

따라서 본 연구에서는 액체질소 예냉식 Linde-Hampson 사이클을 이용하여, 최근 초전도응용분야에 적용가능성이 시험되고 있는 JT 냉동기를 설계, 제작하였으며, 적용 예상온도인 80 K 이하의 온도영역에서 성능실험을 수행하였다. 수소압축기를 고압용 저장탱크로 대체하고, 수소팽창시 팽창 전 온도를 최대역전온도 이하로 낮추기 위하여 액체질소를 사용하여 예냉하는 방법이 적용되었으며, 제작된 수소JT냉동기의 냉각특성(Cool-down)과 냉동능력이 측정되었으며, 기존 다른 냉각방식의 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

JT밸브를 이용한 수소냉동기는 열교환기, JT

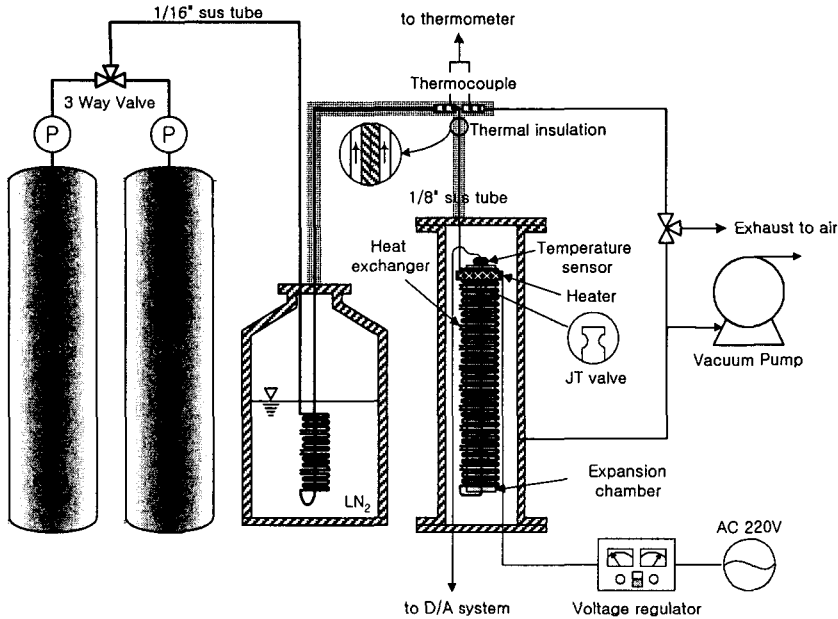


Fig. 1 Schematic diagram of a JT cryocooler with LN<sub>2</sub> precooling.

밸브, 팽창챔버(expansion chamber), 예냉기, 저온조(cryostat), 가열기, 진공시스템, 극저온 온도계, 질량유량계 및 압력센서 등으로 구성되었으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

열교환기는 상온 고압으로 유입되는 기체와 팽창된 후의 저온기체를 열교환시키기 위하여 제작하였으며, 외측관 1/8" SUS관내에 내측관 1/16" SUS관을 삽입한 이중관 열교환기(co-axial double tube heat exchanger)의 형태로 유동방향이 반대인 대향류형(counterflow) 열교환방식을 채택하였으며, 총 길이 10 m로 제작되었다. JT밸브는 열교환기의 내측관 1/16" SUS관의 말단 단면을 인위적으로 축소시킨 단순한 형태로 제작하여 팽창챔버 내부까지 유입시켰다. 팽창챔버는 열교환기의 외측관과 연결되어 있으며, 내측관을 통하여 유입된 고온기체가 말단의 JT밸브를 통과하면서 팽창챔버 내부로 팽창된다. 팽창된 저온기체는 다시 팽창챔버와 연결된 열교환기의 외측관을 통하여 배출되면서 내측관의 고온기체와 열교환하게 된다. 팽창챔버 주위에는 테이프형 가열기(tape heater, Minco사)를 감아 막힘현상 발생시 순간적으로 JT밸브를 가열할 수 있도록 하였으며, 냉동성능 시험시 열부하로 작용하여

냉동기의 냉동능력을 측정할 수 있도록 하였다. 가열기는 전압조정기(voltage regulator)를 이용하여 전원을 공급, 조절하였다.

수소를 최대역전온도이하에서 팽창시키기 위하여 사용된 예냉방법으로는 먼저 기체질소와 액체질소를 사용하여 냉각시스템 내 JT밸브 통과직전의 온도를 수소의 최대역전온도 이하로 냉각시킨 후, 수소를 유동시켜 팽창하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 동일한 유로 내에 질소와 수소가 유동하게 되므로, 질소 예냉 후, 수소를 유동시키기 전에 충분히 퍼지과정(purge process)을 거치지 않으면 유로 내에 잔존하는 질소로 인하여 JT밸브에 막힘현상이 발생할 수 있는 단점이 있으나, 별도의 추가적인 예냉용 배관이 필요없는 장점이 있다. 수차례에 걸친 예비실험결과, 유로 내의 압력을 0.1 Torr ~ 2 MPa로 변화시키면서 3회 이상 퍼지과정을 반복하면 이러한 막힘현상은 충분히 예방할 수 있었다. 보다 효율적인 예냉을 위하여 액체질소를 사용하여, 질소 및 수소의 온도를 저온조 내로 유입되기 전에 100 K까지 냉각하였다.

열교환기와 JT밸브, 배관 등을 포함한 대부분 실험장치는 대략 100 K 이하에서 작동하게 되므

로, 상온으로부터 유입되는 대류, 복사, 전도형태의 열손실을 최소화 할 수 있는 저온조가 설계되었다. 저온조는 직경 150 mm, 길이 500 mm의 원통형으로 제작되었으며, 모두 스테인리스강으로 제작되었다. 저온조 내부, 열교환기 및 JT밸브 표면에 모두 초단열재(super insulation)를 50 겹 정도 감아 복사열손실을 최소화하였으며, 저온조 내부는 진공펌프를 이용하여 진공도  $5 \times 10^{-3}$  Torr를 유지함으로써 대류 및 전도열손실을 최소화하였다.<sup>(1),(9)</sup> JT밸브 팽창 직후의 온도를 측정하기 위하여 팽창챔버 외측에 극저온용 온도센서(silicon diode sensor, Lakeshore사)가 부착되었으며, 측정된 온도는 격벽형 커넥터(feedthru)를 통하여 저온조 밖에 위치한 자료획득장치(data acquisition system)에 기록된다. 실험시 작동유체의 질량유량을 측정하기 위하여 질량유량계(mass flow meter, Aalborg사)가 설치되었으며, 작동유체의 팽창 전, 후의 압력을 측정하기 위하여 압력센서가 장착되었다.

### 3. 실험결과 및 토의

우선 고온, 고압의 수소기체를 JT밸브를 통과시켜 냉각을 수행하기에 앞서 고온, 고압의 질소를 액체질소로 예냉한 후 팽창시켜, 열교환기, 팽창챔버 및 JT 밸브의 온도를 수소의 최대역전온도 이하로 냉각시키는 예냉과정을 수행하였다. 상온으로부터 냉각을 시작하는 실험초기에는 큰 유량을 사용하는 것이 일반적이며<sup>(7)</sup>, 적은 유량을 사용하여 실험을 시작할 경우, 상온상태의 고체(유로)를 기체(질소)로 냉각하기에는 많은 시간이 소요되기 때문이다. JT밸브의 단면적을 변화시키면서 반복하여 실험한 결과, 적절한 성능을 나타내는 JT밸브의 단면적과 질소 및 수소압력범위를 선정하였으며, 이때 예냉용 질소압력은 2 MPa로 충분히 냉각이 가능함을 알 수 있었다. JT밸브의 단면적이 감소할수록 동일한 공급압력에 대하여 압력강하가 증가하여 온도 감소폭도 증가하게 되나, 적은 유량으로 인하여 예냉시간 및 질소의 소모량이 매우 증가하였다. 역으로 JT밸브의 단면적이 증가할수록 동일한 공급압력에 대하여 큰 유량으로 인하여 예냉시간이 감소하나, 압력강하정도가 감소하여 온도의 감소는 그리 크지 않았다. 이와 같이 주어진 냉각시스템에

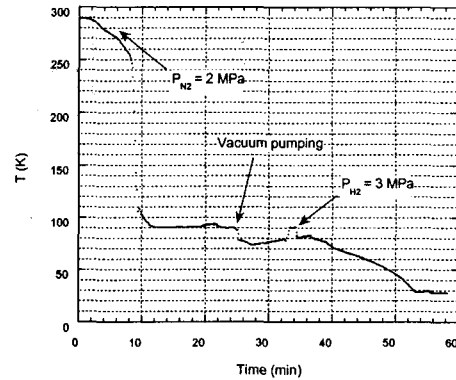


Fig. 2 Cool-down characteristic for the JT cryocooler with  $N_2$  and  $H_2$  gas.

적절한 예냉시간과 질소소모량 등을 고려하여 JT밸브의 단면적을 결정하는 것이 중요하다.

Fig. 2는 상온 2 MPa의 질소와 액체질소를 이용하여 냉각시스템을 예냉시킨 후, 진공펌프를 이용하여 유로 내의 질소와 그 밖의 불순물을 제거하는 퍼지과정을 수행한 다음, 상온 3 MPa의 수소를 액체질소조 내의 열교환기를 통과시킨 후 JT밸브에서 팽창시켜 정상상태에 도달할 때까지의 온도변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 질소로 예냉을 시작한 후 약 12분 정도 경과하면 정상상태에 도달하고 있는 것을 알 수 있으며, 이때의 도달온도는 90.3 K이다. 약 24분 경, 퍼지과정을 위하여 질소의 공급을 중단하고 진공펌프를 작동시키면, 유로 내에 남아있던 질소기체가 증기압 강하로 인하여 온도가 감소하게 된다. 약 27분 경, 잔여질소가 충분히 배출되면 열손실로 인하여 냉동기의 온도는 서서히 증가하게 된다. 32분 경, 상온 3 MPa의 수소를 공급하면, 잠시 시스템내의 온도가 상승하게 되는데, 이는 퍼지과정동안 열손실로 인하여 배관 및 열교환기 일부분의 온도가 이미 상승해 있기 때문이다. 34분 후부터 열교환기로 인하여 최대역전온도 이하로 냉각된 수소는 JT밸브를 통과하면서 더욱 냉각되어 약 53분 경 정상상태에 접근하며 최종적으로 58분 경 최저온도인 28.2 K에 도달하게 된다.

수소의 공급압력 변화에 따른 최저도달온도의 변화를 알아보기 위하여, 수소의 공급압력을 각

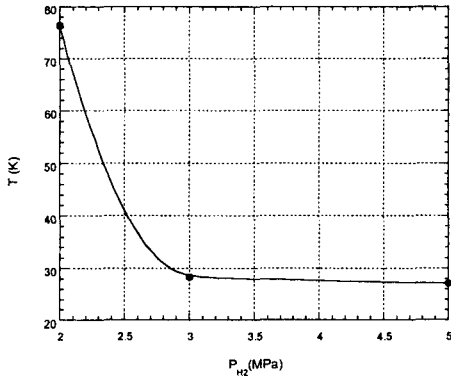


Fig. 3 Effect of H<sub>2</sub> feeding pressure on steady state temperature.

각 2 MPa, 3 MPa 및 5 MPa로 변화시키면서 최저도달온도를 측정 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 수소압력이 증가함에 따라 최저도달온도는 감소함을 보이고 있다. 이는 공급압력이 증가함에 따라 압력강하량도 증가하기 때문이며, 냉각을 위한 입력일이 증가됨에 따른 냉각온도의 감소측면에서도 예상되는 결과이다. 또한 2 MPa과 3 MPa사이에서는 최저도달온도가 급격히 감소하나, 3 MPa 이상에서는 최저도달온도의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 3은 무부하 상태에서 실험한 결과를 나타낸 것이나, 적용이 가능한 임의의 온도에서의 냉동능력을 알아보기 위하여 가열기를 사용하여 팽창챔버에 열부하를 가하면서 실험한 결과를, 현재 유사한 목적으로 개발되고 있는 다른 냉동기들의 대표적인 성능과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 x축 상에 표시된 3가지 실험결과는 본 연구에서 수행된 결과 중, 무부하상태의 결과를 나타낸 것이다. 우선 본 연구에서 수행된 실험결과를 살펴보면, 수소의 경우 열부하가 증가함에 따라 최저도달온도는 증가함을 보이고 있으며, 이는 냉동기의 성능이 주어진 경우 냉동온도가 감소함에 따라 냉동능력이 감소한다는 자명한 결과이다. 동일한 온도에서는 압력이 증가함에 따라 적용가능한 열부하도 증가함을 알 수 있다. 이는 수소의 압력이 증가함에 따라 동일한 JT밸

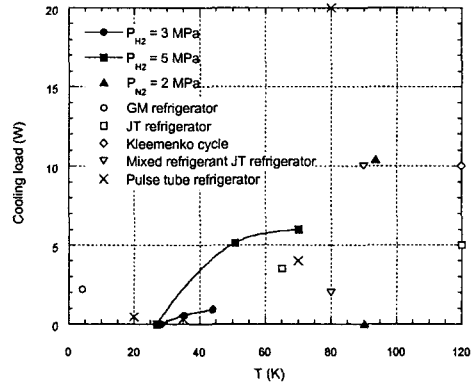


Fig. 4 Cooling load as a function of the steady state temperature for various H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> pressures.

브의 단면적에 대하여 질량유량이 증가하므로 냉동능력이 증가하기 때문이다. 질소의 경우, 높은 냉각온도와 질량유량으로 인하여 93.6 K에서 10.4 W의 우수한 냉동능력을 보이고 있다. 이상의 실험결과, 5 MPa의 수소를 공급한 경우 각각 50 K에서 5 W, 70 K에서 6 W, 3 MPa의 수소를 공급한 경우 각각 35 K에서 0.55 W, 44 K에서 0.93 W정도의 성능을 보이고 있다. 타 냉동기들의 성능과 비교할 때, 현재 GM냉동기는 4 K 부근에서의 냉동성능을 증가시키기 위한 연구들이 많이 진행되고 있으며, 맥동관 냉동기는 20-80 K의 온도범위에서 광범위하게 연구되고 있다.<sup>(10-12)</sup> 2종 이상의 작동유체를 사용하는 Kleemenko사이클과 혼합냉매를 이용한 JT냉동기들은 대략 80 K 이상의 온도범위에서 응용될 목적으로 연구되었다.<sup>(13-14)</sup> 또한 JT냉동기에 대한 연구는 작동유체로서 질소를 사용하였기 때문에 65 K 이상의 냉각온도에서 시험되었다.<sup>(15)</sup> Fig. 4에서 보는 바와 같이 여러 온도범위에 걸쳐 사용 목적에 따라 적절한 냉동기가 선택될 수 있겠으나, 수소를 작동유체로 하는 JT냉동기는 적용 온도범위, 냉동성능 및 제작의 편의성에 있어 상당히 의미있는 것이라 할 수 있다.

본 실험은 고압기체를 공급하기 위하여 압축기 대신 고압저장탱크를 사용하였으므로 냉동기의 냉동성능지표인 성적계수(COP: coefficient of

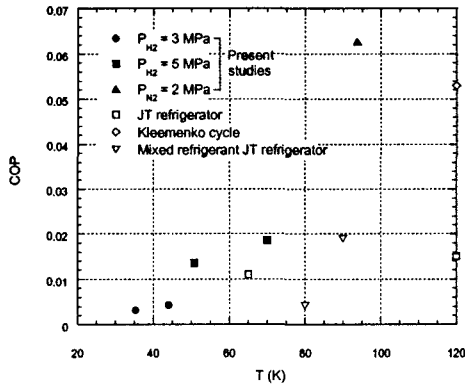


Fig. 5 Effect of steady state temperature on COP for various pressures.

performance) 계산에 필요한 압축일을 측정하기 어렵다. 그러나 주어진 압력에 대한 등온압축일을 이용하면 실제압축에 필요한 압축일에 비해 과소평가될 수 있으나 대략의 성적계수를 계산할 수 있다. 본 실험에서 얻어진 냉동능력과 등온압축일로부터 계산된 성적계수와, Fig. 4에 비교된 타 냉동기 중 JT밸브를 사용하는 시스템의 성적계수를 Fig. 5에 나타내었다. 우선 본 연구에서 수행된 실험결과를 살펴보면, 수소의 경우 압축압력이 증가함에 따라, 냉동온도가 증가함에 따라 성적계수도 증가함을 알 수 있다. 질소의 경우, 주어진 압력이 작으므로 압축압력이 수소에 비하여 작고, 냉동능력과 냉동온도가 높기 때문에 수소의 경우보다 큰 성적계수를 나타낸다. 본 연구결과는 등온압축일을 사용하여 성적계수를 계산하였기 때문에 타 냉동기의 성적계수보다 전체적으로 약간 높은 값을 가지고 있다. 특이할 만한 점은 타 냉동기들에서 사용된 작동유체는 질소, 혹은 질소와 탄화수소, 메탄, 에탄 등의 혼합물이 사용되었으므로, 작동유체의 물성으로 인하여 60 K 이상의 냉각온도를 얻었다. 이에 반해 본 연구에서는 수소를 냉매로 채택하였기 때문에 60 K이하의 온도에서 냉각능력을 얻는 것이 가능하였다. 이러한 관점에서 타 냉동기와 유사한 입력일을 사용하여 수소 JT냉동기를 운전할 경우, 보다 낮은 온도에서 유사한 냉동능력을 얻을 수 있다는 것이 수소를 작동유체로 하는 JT 냉

동기의 이점이라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온초전도체 응용분야에 냉각기로 사용될 목적으로, 기존의 JT냉동기보다 낮은 온도에서 유사한 냉동성능을 나타낼 수 있는 수소 JT냉동기를 제작하여 성능시험을 수행하였다.

JT냉동기내의 온도를 수소의 최대역전온도 이하로 냉각하기 위하여 2 MPa의 질소와 액체질소를 이용하여 예냉하였다. 수소 JT냉동기의 최저 도달온도는 작동압력이 2 MPa과 3 MPa사이에서는 급격히 감소하나, 3 MPa이상의 작동압력에서는 최저도달온도의 변화가 미미하였다. 임의의 온도에서 냉동능력을 알아보기 위하여 가열기를 사용하여 열부하 실험을 반복하였다. 그 결과 수소의 경우, 35-70 K에서 약 0.5-6 W, 질소의 경우 93.6 K에서 10.4 W의 냉동능력을 나타내었다. 또한 수소를 냉매로한 JT냉동기의 경우 질소 및 탄화수소 등의 혼합물을 냉매로 사용한 경우에서도 도달할 수 없었던 60 K이하의 온도에서 냉각능력을 얻는 것이 가능하였다.

본 연구에서 얻어진 결과는 고온초전도체 응용분야의 냉각시스템 설계시 요구되는 냉각온도와 냉동성능의 제한조건을 보다 완화하는데 활용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. Timmerhaus, K. D. and Flynn, T. M., 1989, Cryogenic Process Engineering, Plenum Press, New York and London, U.S.A.
2. Maley, M. P., Kung, P. J., Coulter, J. Y., Carter, W. L., Riley, G. N. and McHenry, M. E., 1992, Behavior of critical currents in Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O/Ag tapes from transport and magnetization measurements : Dependence on temperature, magnetic field, field orientation, Physical Review, Vol. 45, No. 13, pp. 7566-7569.
3. Richardson, R. N. and Tavner, A. C. R., 1995, Neon liquefaction system for high Tc experiments, Cryogenics, Vol. 35,

- pp.195-198.
4. Blumenfeld, P. E. and Pfothenauer, J. M., 1997, Closed-cycle Neon refrigerator for high-temperature superconducting magnets, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 547-555.
  5. 백종훈, 강병하, 장호명, 1997, 직접냉각에 의한 수소액화장치의 성능실험, 공기조화냉동공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 284-291.
  6. ATD(Advanced Technology Division), 1997, Regulating and dual setting Joule-Thomson Refrigerators, Technical specifications, L'Air Liquid Co., France.
  7. Walker, G., 1989, Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics, Clarendon Press, Oxford, U.S.A.
  8. Hedegard, K., Atkins E. and Walker, G., 1990, Low capacity Linde-Hampson N<sub>2</sub> liquefier, Advanced in Cryogenic Engineering, Vol. 35, pp. 1349-1356.
  9. White, G. K., 1987, Experimental Techniques in Low-Temperature Physics, 3rd ed. Clarendon Press, Oxford Univ. Press, U.S.A.
  10. Burt, W. W. and Chan, C. K., 1997, New Mid-size High Efficiency Pulse Tube Coolers, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 173-182.
  11. Russo, S. C. and pruit, G. R., 1997, Development of a Low-cost Cryocooler for HTS Applications, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 229-237.
  12. Koh, D. Y., Park, S. J., Lee, S. J., Yeom, H. K., Hong, H. K. and Jeong, S. K., 1997, An Experimental Investigation of the Pulse Tube Refrigerator, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 239-245.
  13. Little, W. A. and Sapozhnikov, I., 1997 Low Cost Cryocoolers for Cryoelectronic Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 509-513.
  14. Khatri, A. and Boiarski, M., 1997, A Throttle Cycle Cryocooler Operating with Mixed Gas Refrigerants in 70K to 120K Temperature Range, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 515-520.
  15. Levenduski, R. and Scarlotti, R., 1997, Joule-Thomson Development at Ball Aerospace, Proceedings, 9th International Cryocooler Conference, Waterville Valley, New Hampshire, pp. 493-508.