

## 직접냉각에 의한 수소액화장치의 성능실험

### Performance experiment of a hydrogen liquefaction equipment by direct cooling

백 증 훈\*, 강 병 하\*, 장 호 명\*\*  
J. H. Baik, B. H. Kang, H. M. Chang

**Key words :** Hydrogen liquefaction(수소액화), Direct cooling(직접냉각), Gifford-McMahon refrigerator(GM냉동기), FOM(figure of merit, 액화효율)

#### Abstract

A hydrogen liquefaction equipment by direct cooling has been designed and built at KIST. Cool-down characteristics and liquefaction performance of the equipment have been investigated. The hydrogen liquefaction equipment consists of a GM refrigerator, a liquefaction vessel, a radiation shield and a cryostat. It is found that the hydrogen starts to be liquefied in the liquefaction vessel after 40~50 minutes of cool-down from the gas state of 270K. The effect of natural convection phenomena of charged gas in liquefaction vessel on the cool-down characteristics is evaluated by comparing with those in vacuum of liquefaction vessel. It is seen that the cool-down time of a liquefaction vessel is substantially increased in vacuum environment of liquefaction vessel. The experiments have been performed for 1~5 atm of hydrogen pressure to investigate the influence of hydrogen pressure on the liquefaction rate and figure of merit(FOM). It is found that both liquefaction rate and FOM are increased as the charged hydrogen pressure is increased.

#### 1. 서 론

화석연료의 과다한 사용으로 인한 대기오염과 지구온난화는 더욱 심각해지고 있으며 이 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 최근 국내외에서는 탄화수소계가 아닌 연료를 사용하는 시스템의 개발이 활발히 진행중이다. 그 중 가장 대표적인 것이 바로 수소이용기술이며 가스형태로 생성된 수소를 각

종 이용시스템에 사용하기 위해서는 부피를 축소시켜야 수송도 간편하고 저장도 용이하여 쉽게 사용할 수 있게 된다.<sup>(1~4)</sup> 수소의 부피를 축소시켜 저장하는 방법 중 저장용기의 무게를 포함한 단위질량 당 저장에너지가 가장 큰 것은 액체수소형태로 저장하는 방법이다.<sup>(2)</sup> 따라서 저장 및 수송이 용이한 액체 수소상태로의 수소저장을 위해 수소액화 및 저장에 관해 관심이 고조되고 있으며, 특히 저온공학(cryogenic engineering)을 이용한 수소액화기, 저장용기, 펌프, 수송차량 등에 대한 연구가 활발히 진행중이다.<sup>(5~9)</sup>

\* 한국과학기술연구원, 공조·환경제어연구팀

\*\* 홍익대학교 기계공학과

수소액화에 이용될 수 있는 극저온용 액화사이클로는 액체질소 예냉식 Linde-Hampson 사이클, 액체질소 예냉식 Claude 사이클, 액체질소-기체헬륨 예냉식 수소액화사이클, GM-JT 사이클 등을 들 수 있다.<sup>16~19)</sup> 이 중 액체질소 예냉식 Claude 사이클은 주로 대형 수소액화시스템에 많이 이용되고 있으며, 그 예로 Claude 액화사이클을 이용한 액화능력 2,000Nm<sup>3</sup>/hr급 대형액화플랜트도 운영되고 있다.<sup>15)</sup> 소형 액화시스템의 경우는 열재생형 극저온냉동기 중의 하나인 Gifford-McMahon 냉동기(이하 GM냉동기)를 예냉기로 사용하여 기체수소를 충분한 온도, 즉 역전온도 이하로 냉각한 후 Joule-Homson 밸브(이하 JT밸브)를 통한 팽창과정으로부터 액체수소를 얻는 GM-JT 액화사이클 및 단일 GM냉동기를 기체수소에 직접 접촉시켜 냉각하여 액화시키는 직접냉각방식의 액화사이클 등이 고려된다. 이 중 GM-JT 액화사이클은 직접냉각방식보다 큰 용량의 수소액화를 기대할 수 있으나 수소압축기, 열교환기, JT밸브 등 사이클 구성이 복잡하고 고가인 단점이 있다. 그러나 실제로 현재 널리 사용되고 있는 상용화된 GM냉동기는 보통 무부하에서 약 10K까지 도달가능하며 수소는 비등점이 20.3K<sup>10)</sup> 정도로 JT밸브를 통한 액화방법 이외에도 GM냉동기의 자체 냉각성능만으로 소량의 수소액화가 가능하다고 판단된다. 실제로 냉동기 직접냉각방식을 이용한 네온(비등점 27.1K)의 액화연구는 최근 시도된 바 있으며, 이는 액체네온을 이용하여 고온초전도체를 냉각하고자 GM냉동기를 사용하여 비교적 간단하게 구성된 액화시스템을 제작한 경우였다.<sup>11)</sup>

따라서 본 연구에서는 충분한 냉각용량을 가진 GM냉동기만을 이용하여 GM-JT액화사이클보다 구성이 간단하고 저가이며 유지보수가 간편한 직접냉각방식의 액화방법을 선정하였다. 이로부터 수소액화장치를 설계, 제작하고, 준비된 액화장치의 cool-down 특성 및 warm-up 특성실험을 수행하였으며, 액화장치의 수소충전압력이 액화성능에 미치는 영향을 실험으로 규명하였다.

## 2. 액화장치의 설계 및 성능실험

### 2.1 액화장치의 설계

기체수소를 냉동기에 직접 접촉시켜 절대온도 20K까지 냉각시키기 위해서는 냉동기의 최대 냉각 성능이 결정되어 있는 경우 상온으로부터 유입되는 전도(conduction), 복사(radiation) 열손실등을 최대한 감소시킬 수 있는 기술이 반드시 포함되어야 한다.<sup>16~19)</sup> 또한 기체수소가 냉동기에 직접 접촉되어 냉각되는 경우, 보다 효율적인 냉각을 위한 설계가 고려되어야 하며, 냉각 혹은 액화된 수소가 저장되는 액화용기 또한 냉동기에 의해 충분히 냉각되어야 한다. 이러한 제반 사항들을 모두 고려하여 설계된 액화장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

본 연구에서 직접냉각용으로 사용된 GM냉동기(CTI사, Model 1020CP)는 2단으로 구성되어 있으며 냉동기의 1단과 2단을 모두 기체수소와 액화용기에 직접 접촉시켜 동시에 냉각하도록 설계하였다. 냉동기는 1단 77K에서 35W, 2단 20K에서 12W정도의 냉각성능을 갖추고 있으며 그 성능곡선을 Fig.2에 나타내었다. 액화용기는 상온으로부터의 전도열손실을 최소화하고 냉각시간을 최대한 줄이기 위하여 각 부분의 두께를 모두 1mm로 제작

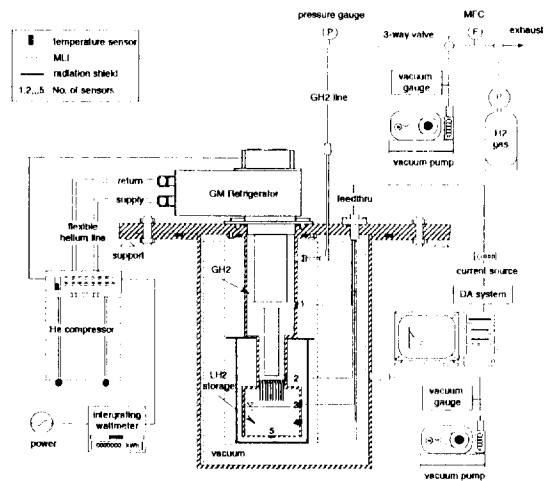


Fig.1 Schematic diagram of H<sub>2</sub> liquefaction apparatus

하였으며 재질은 스테인레스강을 사용하였다. 냉동기와 액화용기와의 기계적인 접촉이 완전하지 않으면 적절한 냉각을 수행할 수 없으므로 이 부분의 설계가 액화장치의 액화성능을 좌우할 만큼 중요하다고 할 수 있다. 따라서 냉동기와와의 접촉부분을 가공공차 1/500mm이하로 정밀하게 가공한 후 연마처리를 하고, 전열용 그리스(high conductive thermal grease)를 접촉표면에 도포하여 냉동기의 표면과 완전한 접촉이 이루어지도록 하였다. 이때 냉동기의 1단, 2단과 접촉되는 액화용기의 표면에 직경 7mm의 구멍을 뚫고, 이 부분에 극저온용 온도센서(silicon diode temperature sensor, Lake-Shore사, Model DT-470)를 부착하여 냉동기 표면의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 극저온용 온도센서는 액화용기의 하단부분인 액체수소 저장용기에도 3개를 부착하였으며, 각각 용기의 하단 및 용기측면의 1/3, 2/3지점에 위치되게 하였다. 또한 냉동기의 2단 하단부분에는 열전도율이 높은 구리로 된 핀-플레이트(finned plate)를 부착하여 냉동기의 2단과 기체수소와의 접촉면적을 증가시켜, 보다 빠르고 효율적인 냉각을 수행하도록 설계하였다. 핀-플레이트는 얇은 구리핀(copper fin)들을 구리로 된 원판(circular plate)위에 동심원형태로 용접하여 제작하였다. 제작된 액화용기 및 핀-플레이트의 상세한 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of liquefaction vessel

component	item	dimensions [mm]
1st stage	inner diameter	89
	thickness	1
	length from the top of liquefaction vessel	179
2nd stage	inner diameter	57
	thickness	1
	length from the 1st stage	146
liquid H <sub>2</sub> storage vessel	inner diameter	100
	depth	126
	inner volume	0.99(ℓ)
	thickness	1
circular plate (for finned plate)	diameter	56
	thickness	2.2
copper fin	thickness	0.3
	width	8
	length	50
	number of fins	36

액화용기는 수소가스통으로부터 일정한 압력의 기체수소를 공급받게 되며 GM냉동기의 1단과 2단과의 접촉에 의해 냉각된다. 이때 액화용기가 냉동기와 접촉된 1단과 2단 부분, 액체수소 저장용기의 상-중-하단에 각각 극저온용 온도센서가 부착되어 온도를 측정하게 된다. 또한 액화가 진행됨에 따라 충전된 수소의 비체적 감소로 인하여 연속적인 기체수소의 보충이 필요하게 되며, 이때 보충되는 수소의 양을 수소유량계(unit instruments사, UFC9360)를 이용하여 측정함으로써 수소의 액화량을 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 전원과 냉동기 사이에 적산전력계(integrating wattmeter)를 설치하여 실험에 사용된 전력량을 실험시간과 함께 적산하여 기록함으로써, 액화에 사용된 총 입력일을 측정할 수 있도록 하였다. 외부로부터의 대류, 전도 및 복사열손실을 최소화하기 위하여 진공챔버와 복사쉴드를 액화용기의 외측에 설치하였다. 복사쉴드는 방사도(emissivity)가 낮은 두께 0.3mm의 무산소동(OFCu : oxygen free cop-

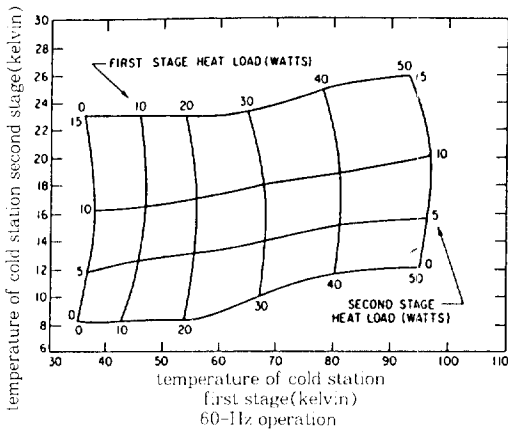


Fig.2 Performance curve of the GM refrigerator

per)으로 제작되었으며, 진공챔버의 내측과 복사열드의 외측을 초단열재(MLI; multi-layer insulation)로 30겹(두께 약 10mm)을 감아 복사열손실을 극소화하였다. 진공챔버는 진공펌프를 이용하여  $2 \times 10^{-3}$  torr 정도로 진공도를 유지하였으며 초단열재와 병행하여 액화장치에 적용하여 외부로부터의 복사열손실을 1W 이내로 줄일 수 있도록 하였다. 그 밖에 온도센서로부터의 신호처리를 위한 격벽형 커넥터(feedthru connector), 데이터 획득장치(data acquisition system) 등을 준비하였다.

## 2.2 성능실험

수소액화장치의 성능실험을 통하여 액화장치가 정상상태에 도달하는 냉각특성과 냉각시간, 최저도달온도, 액화량, 액화일, 액화효율 등이 측정된다. 우선 액화장치의 성능실험에 앞서 본 연구에 사용된 GM냉동기의 무부하 성능실험을 수행하였다. 이는 액화용기 및 복사열드 등을 장착하지 않고 초단열재와 진공용기만을 장착하여 실험하였다. 수소를 액화용기내에 충전하여 사용한 수소액화실험에서는 용기내의 압력을 3기압으로 일정하게 유지하면서 그 냉각특성을 실험하였다. 이는 액화된 수소를 액체수소 이송관을 통하여 저장할 경우 보통 1.3기압내지 1.5기압 정도로 저장한다고 보고되고 있으며<sup>[7-13]</sup>, 이렇게 저장용기로 이송할 경우 액화되지 않은 기체수소와 대기압과의 압력차를 이용하여 이송한다면 수소의 압력은 1.5기압내지 3기압 정도가 적절할 것으로 예상되기 때문이다. 또한 액화용기내에 진공을 생성하여 냉각되는 기체의 자연 대류현상을 배제한 냉각실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 액화용기내 충전된 수소압력이 액화 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수소의 압력을 1기압에서 5기압으로 변화시키면서 각각의 경우에 대한 액화율, 액화일, 액화효율, 정상상태의 온도 및 시간을 기록하였다.

동일한 초기조건에서 실험을 수행하여야 적절한 비교를 할 수 있기 때문에 냉각실험을 수행하기 전의 초기온도를 270K으로 설정하였다. 실험 전 진공펌프를 이용하여 액화용기내의 공기를 제거하고 수소를 충전하는 과정을 2~3회 반복하는 퍼지(purge)과정을 수행한 후 냉동기를 작동시켜 시간

에 따른 냉각특성을 기록하였으며 실험 중 진공펌프를 계속 작동시켜 적절한 진공도를 유지하였다. 냉각실험 후에는 냉동기의 운전을 정지한 후 시간에 따른 warm-up 특성을 각 경우에 대하여 기록하여, 액화시스템으로 유입되는 열손실의 경향과 온도상승에 따른 액화용기 각 부분의 온도상승 특성을 알아보았다. 이때 액화용기내 온도상승에 따른 용기내의 과도한 압력상승은 절대압력 10기압으로 조정된 릴리프밸브(relief valve)를 이용하여 기체수소를 대기로 배출시킴으로써 해결하였다.

## 3. 실험결과 및 토론

본 연구에 사용된 냉동기의 성능을 측정하기 위하여 무부하에서의 냉각실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 냉동기의 1단이 먼저 냉각되며 1단에서 충분한 냉각이 이루어진 후 2단의 냉각이 급속히 수행된다. 정상상태에 도달하는데 소요된 냉각시간은 약 30분 정도였다. 무부하에서의 최저도달온도는 1단에서 26K, 2단에서 8.3K으로 냉동기 제조사에서 제공한 냉동기 성능곡선(Fig.2)과 비교해볼때 1단의 성능이 약간 우수한 것으로 나타났다. 또한 제공된 성능곡선은 열손실이 전혀 없을 때의 결과이므로 본 실험장치의 단열시스템의 설계 및 제작은 적절한 것으로 판단된다.

액화장치의 냉각특성을 실험하기 위하여 냉동기

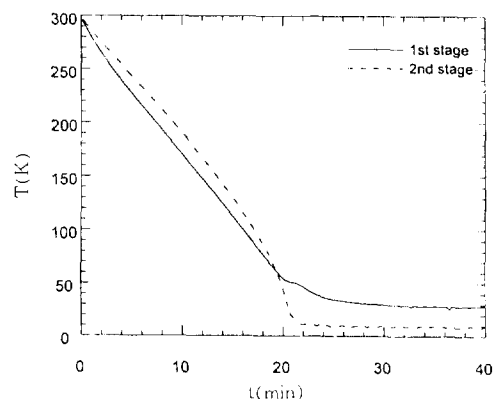


Fig.3 Cool-down characteristics without load

의 1단과 2단에 액화용기를 접촉시키고 Fig.1에 표시된 바와 같이 액화용기의 외측에 5개의 온도 센서를 장착하고 복사필드와 초단열재를 장착하였다. 번호 1, 2는 냉동기의 1단 및 2단의 온도를 나타내고, 3, 4는 액화용기의 옆면, 5는 액화용기의 밑면의 온도를 나타낸 것이다. Fig.4(a)는 액화용기내에 수소를 3기압으로 충전하고 이를 유지하면서 초기온도가 270K일 때 냉동기를 작동시킨 후의 냉각특성을 나타낸 결과이다. 우선 무부하일 때보다 30K 이하로 온도를 냉각시키는 시간이 많이 걸리는 것을 관찰할 수 있으며 냉동기의 1단 및 2단 온도의 냉각곡선과 액화용기 표면의 온도인 3, 4, 5의 냉각곡선이 그 양상에 있어 차이가 있는 것을 알 수 있다. 냉동기의 1단, 2단 및 액화용기가 충분히 냉각된 후 3기압에서의 수소 포화온도인 24.6K에 도달하면 냉동기의 1단을 제외한 2, 3, 4, 5번의 온도가 이 온도로 모두 일정하게 유지되며 이는 수소의 액화가 시작되어 진행되고 있음을 나타내고 있다. 액화가 시작될 때 냉동기 1단의 온도는 다시 조금씩 상승하게 되며 이는 수소의 잠열(latent heat)에 의한 냉각부하의 증가 때문인 것으로 판단된다. 액화가 계속 진행되어 냉동기 1단의 온도상승율이 0일 때 액화장치가 정상상태에 도달한 것이다. 이때의 액화량은 0.0187g/s(12.65NL/min)로 나타났다.

액화장치의 warm-up 특성을 규명하기 위하여 냉동기의 작동을 멈춘 후, 각 부분의 온도를 기록한 결과를 Fig.4(b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 냉동기의 1단 및 2단의 온도는 급격히 상승하게 되나, 액화용기내의 온도는 조금씩 상승하게 된다. 그 이유는 앞서 언급한 바와 같이 relief밸브가 10기압으로 조정되어 있으며 이 압력에 도달할 때까지는 밀폐된 액화용기내의 상승된 압력에 대응하는 포화온도로 유지되며 액화된 수소도 천천히 기화되기 때문이다. 그 후 계속해서 천천히 상승하던 온도는 액화용기내의 압력이 10기압 이상이 되는 약 4시간을 전후하여 미량의 기체수소가 배출되기 시작하면서 급격히 상승하게 된다.

액화용기 내부에 진공상태를 유지하여 순수한 냉동기로부터의 전도열전달만으로 액화용기를 냉각하는 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig.5에 나타

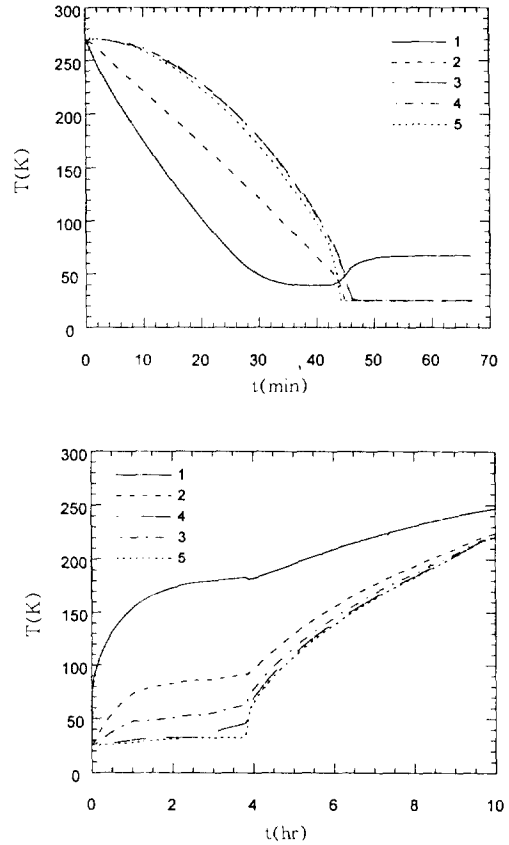


Fig.4 Cool-down and warm-up characteristics of H<sub>2</sub> at 3 atm of charging pressure, (a) cool-down characteristics, (b) warm-up characteristics

내었다. Fig.5(a)에서와 같이 냉각되는 시간이 매우 오래 걸리며 냉동기의 1단을 제외한 2단 및 액화용기의 냉각은 아주 느리게 진행되고 있음을 볼 수 있다. 이는 용기 내 충전된 수소가 냉각되면서 발생하는 자연대류현상이 액화용기의 냉각에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 액화용기를 냉각한 후 기체를 충전하는 방법과 기체를 충전하고 냉각을 수행하는 방법이 그 순서에 따라 매우 큰 차이가 있음을 입증하고 있다. 또한 진공 상태에서의 냉각특성은 기체가 충전된 경우와는 달리 냉동기 1단의 온도가 2단의 온도보다 낮은 결과를 보이며 또한 냉동기의 1단에서 멀리 위치할수록 높은 온도분포를 보이고 있는데, 이는 1단이

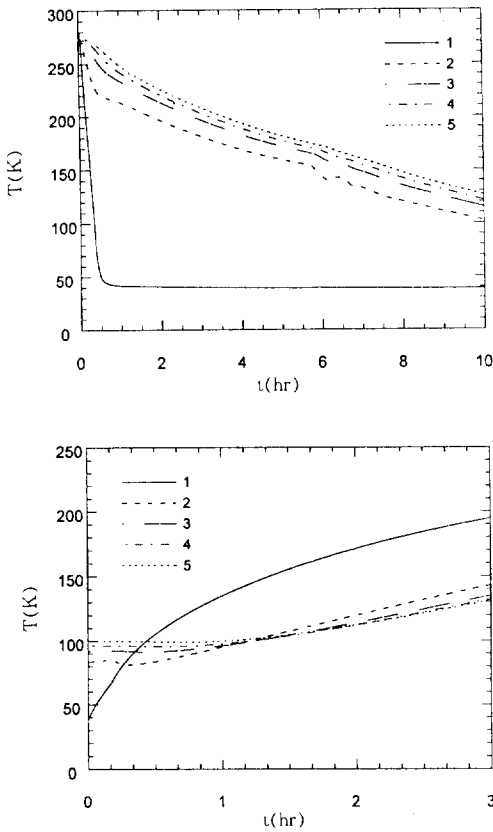


Fig.5 Cool-down and warm-up characteristics in vacuum, (a) cool-down characteristics, (b) warm-up characteristics

먼저 냉각되는 GM냉동기의 특성과 전도열전달만으로의 냉각방식에 의한 영향때문인 것으로 판단된다. Fig.5(b)는 warm-up 특성을 보여주고 있으며 전도열유입에 의하여 온도가 상승되고 있음을 약 1시간 30분 후의 결과로부터 알 수 있다.

액화용기내 충전압력이 냉각특성 및 액화성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수소의 압력을 1기압에서 5기압으로 변화시키면서 실험하였다. Fig.6은 액화용기의 바닥위치인 5번 온도센서에서 측정된 온도를 여러 압력에 대하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와같이 압력이 증가함에 따라 포화온도가 증가하게 되며, 액화가 시작되기까지 소요되는 시간은 조금씩 감소한다. 이는 압력이 증가함에 따라 포화온도가 증가하게 되며 또한 액화용

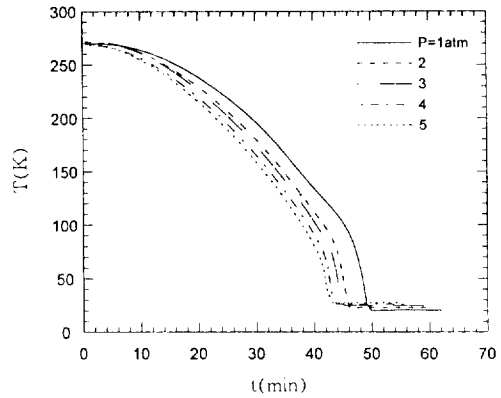


Fig.6 Transient temperature variation at the bottom of the liquefaction vessel for various charging pressures

기내의 밀도가 증가하게 되어 자연대류현상에 의한 냉각효과가 증대되기 때문이다.

Fig.7은 여러 압력변화에 따라 정상상태에서 냉동기 1단과 2단의 온도를 나타낸 것이다. 2단의 온도는 주어진 압력의 포화온도와 같음을 알 수 있으며, 1단의 온도는 압력이 증가함에 따라 조금씩 증가한다. 이는 압력상승으로 인한 용기 내 질량증가가 냉동기에 추가적인 열부하로 작용하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 포화온도가 증가함에 따라 수소의 잠열이 감소하여 보다 큰 액화율을 예상할 수 있으나, 액화된 수소를 지속적으로 포화온도로 유지하기 위한 열부하도 추가적으로 작용하기 때문으로 추정된다.

액화용기내 압력변화에 따른 액화량과 단위 액화량당 입력일의 변화를 Fig.8에 나타내었다. 앞서 예상한 바와 같이 충전압력이 증가함에 따라 액화량은 증가함을 알 수 있으며, 단위 액화량당 입력일은 감소함을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 단위 액화량당 입력일을 이상적인 단위 액화량당 입력일<sup>14)</sup>과 비교한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 이상적인 단위 액화량당 입력일을 실제 측정된 단위 액화량당 입력일로 나눈 값을 액화효율(FOM : figure of merit)로 정의하면, 압력이 증가함에 따라 액화효율은 증가하게 되며, 본 실험에서 사용된 압력범위인 1내지 5기압의 경우, 액화효율은 약 0.033~0.042 정도의 값을 갖는다. 실제로 사용되는 수소

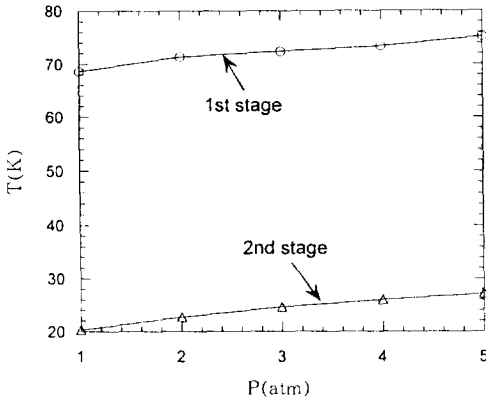


Fig.7 Effect of charging pressure on the steady state temperature of the 1st and the 2nd stage of GM refrigerator

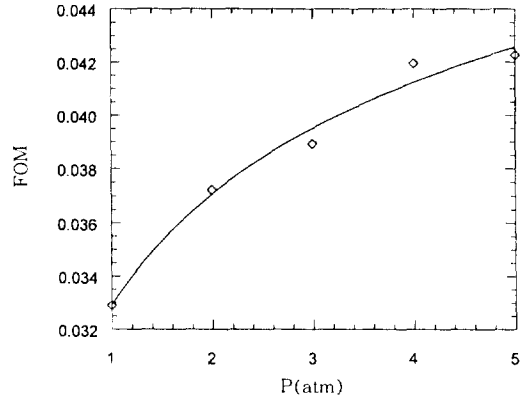


Fig.9 Effect of charging pressure on the FOM (=ideal input work/actual input work)

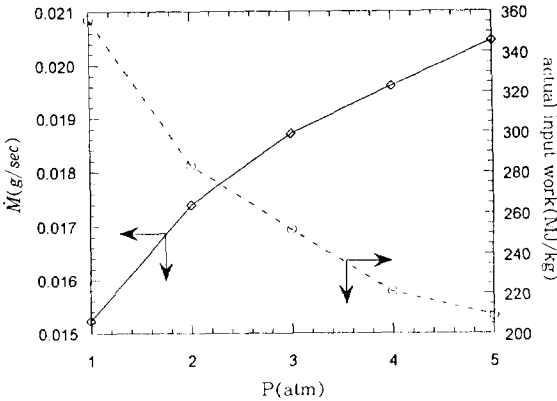


Fig.8 Effect of charging pressure on H<sub>2</sub> liquefaction rate and actual input work per liquefied H<sub>2</sub>

액화사이클, 즉 액체질소나 기체헬륨으로 예냉하고 JT 밸브나 팽창기 등을 사용하는 중대형 액화사이클의 경우에는 대체로 액화효율이 0.2~0.6의 값을 갖는다고 보고되고 있으나<sup>(14)(15)</sup>, 이들은 20~120 기압 정도의 고압 수소를 팽창시키는 경우이며 액화량 또한 매우 크므로, 직접냉각방식이라는 액화 방식 자체가 내재하고 있는 액화량 및 액화효율과는 차이가 있으며, 또한 냉각기로 사용된 GM냉동기의 냉각성능도 중요한 변수로 작용할 수 있다.

이상의 모든 실험에서 측정된 액화량은 액화된 수

소의 ortho-para 수소 비율이 normal-수소의 조성, 즉 ortho-수소와 para-수소의 비율이 75 : 25를 유지한다는 가정하에서 얻어진 것이다. 수소는 상온에서 normal-수소의 조성을 갖고 있으나, 비등점 부근에서 평형을 이루는 ortho-수소와 para-수소의 비율은 0.2 : 99.8이며, 온도가 감소함에 따라 ortho-수소가 para-수소로 천천히 변환되어 para-수소의 비율이 점차 증가하는 성질이 있다. 이때 ortho-수소가 para-수소로 변환되는 과정에서 변환열이 발생하게 되어 액화된 수소를 다시 증발시키게 된다.<sup>(16)(17)</sup> 따라서 실제 중대형 수소액화사이클의 경우에는 액화시 촉매를 사용하여 ortho-para 변환을 가속시켜 대부분의 수소를 para-수소로 변환함으로써, 액체수소 저장시 발생할 수 있는 변환열에 의한 수소증발을 극소화하고 있다.<sup>(17)(8)(14)(15)</sup> 본 연구의 액화실험 시간이 모두 1시간 이내인 것을 감안하면, 액화되는 수소는 normal-수소의 조성을 갖고 있을 것으로 추정되며, 촉매를 사용하여 ortho-para 변환을 가속시킬 경우 변환열에 의한 수소액화량의 변화가 다소 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

수소를 보다 높은 에너지밀도를 가진 액체수소 형태로 저장하여 수송 및 저장이 간편하고 사용이 용이하도록 하는 기술을 개발하고자 직접냉각방식



에 의한 수소액화장치를 설계, 제작하고 그 성능특성을 실험적으로 규명하였다. 수소의 직접냉각을 위하여 GM냉동기를 사용하였으며, 이에 따른 액화용기, 단열용기, 복사실드, 온도, 압력, 유량 및 전력측정장비, 진공시스템 등으로 수소액화실험장치를 구성하였다. 냉각용 GM냉동기의 무부하 성능실험 결과, 본 액화장치의 단열시스템 관련 설계 및 제작이 적절하였음을 알 수 있었다.

액화장치의 냉각특성 및 액화성능 실험은 액화용기내 수소충전압력을 1기압에서 5기압으로 변화시키면서 수행하였으며, 그 결과 냉동기 작동 후 약 40~50분이 경과되었을 때 액화가 시작되고 있음을 확인하였다. 이때의 수소액화량은 0.0152~0.02g/s(10.3~13.8Nl/min)였고, 압력이 증가함에 따라 수소액화량 및 액화효율은 증가하였으며, 단위 액화량당 입력일은 감소하였다. 또한 냉동기 정지 후 상온으로부터 열유입에 따른 warm-up 특성실험을 수행하였다. 액화용기내에 진공상태를 유지하면서 동일한 실험을 수행한 결과, 액화용기 내부에 충전된 기체의 자연대류현상이 배제됨으로 인하여 냉각이 아주 느리게 진행됨을 알 수 있었다. 따라서 직접냉각방식에 의한 수소액화시 수소를 먼저 충전한 후 냉각하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Winter, C.-J., 1987, "Hydrogen Energy-Expected Engineering Breakthroughs", J. of Hydrogen Energy, Vol. 12, pp. 521~546.
2. Barclay, J., 1995, "Cryofuels : Now and in the future", Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Conference Abstract, pp. 102.
3. Daugherty, M. A., Prenger, F. C., Dancy, D. E., Edeskuty, F. J., and Hill, D. D., 1995, "A Comparison of the Overall Energy Efficiency of On-Board Hydrogen Storage Systems Using the EPA Urban Driving Schedule", Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Conference Abstract, pp. 103.
4. 이종태, 1992, "수소엔진 및 수소자동차의 개발현황", 한국수소에너지 학회지.
5. Wanner, M., Gross, R., Otto, W., and Patzelt, A., 1994, "Concept and Operation of a 4.4ton/day Liquid Hydrogen Facility", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 39, Part B, pp. 1217~1222.
6. Timmerhaus, K. D. and Flynn, T. M., 1989 Cryogenic Process Engineering, Plenum Press, New York.
7. Barron, F. B., 1985, Cryogenic Systems, 2nd ed., Oxford University Press, Chapter 4 : Separation and Purification Systems.
8. Weil, L. ed., 1964, Liquid Hydrogen(Properties, Production and Application), Pergamon Press, Oxford.
9. Graham Walker, 1983, Cryocoolers Part I, II, Plenum Press, New York and London.
10. Friend, D. G., 1992, NIST Thermophysical Properties of Pure Fluids Version 3.0, NIST Standard Reference Database 12, U. S. Dep. of Commerce, NIST.
11. Richardson and Tavner, 1995, "Neon liquefaction system for high Tc experiments", Cryogenics, Vol. 35, pp. 195~198.
12. White, G. K., 1987, Experimental Techniques in Low-temperature Physics, 3rd ed, Clarendon Press, Oxford Univ. Press, New York.
13. Messer Griesheim GmbH, 1996, Wide Neck Liquid Hydrogen Dewar : Technical Report, Germany.
14. Scott, R. B., 1964, Technology and uses of liquid hydrogen, Pergamon Press, Oxford.
15. Bracha, M., Loren, G., Wanner, M., 1992, "Large scale hydrogen liquefaction in Germany", Proceedings of the 9th World Hydrogen Energy Conference, Paris, Vol. 2, pp. 1001~1010.