



## [ 요약문 ]

가스액화플랜트는 질소, 산소, 헬륨 등 고순도의 가스를 효율적으로 저장 및 운송을 위해 가스를 액체로 변환하는 플랜트로, 대표적인 플랜트로는 질소, 산소, 아르곤 등의 가스를 생산하는 공기분리플랜트, 헬륨액화플랜트, 수소액화플랜트, 천연가스액화플랜트 등이 있다. 질소, 산소, 수소 등의 가스는 산업의 전반적인 분야에서 널리 사용되고 있으며, 국내의 경우 철강, 반도체, 디스플레이제조산업 등 가스 다소비 분야의 비약적인 발전에 따라 급격하게 수요가 증가하고 있는 상황이다. 대용량의 가스액화플랜트는 원료로부터 불순물을 제거하고, 팽창 또는 열교환 과정을 통해 가스를 액체로 변환하는 극저온기술로 주로 구성되며, 이와 같은 과정은 압축기, 열교환기, 증류탑, 팽창터빈, 콜드박스 등의 구성요소에 의해 구현된다. 따라서 가스액화플랜트에서 효율적인 극저온의 생성 및 유지는 플랜트의 경제성 제고를 위해 핵심적인 요소이다.

## 1. 서론

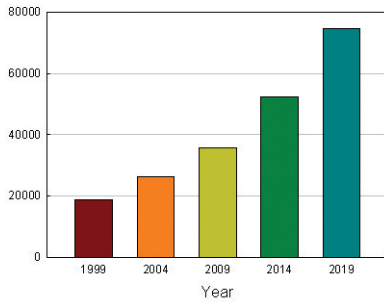
질소, 산소 등의 가스는 산업의 전반적인 분야에서 널리 사용되어지고 있으며, 특히 화학공정, 석유정제, 철강, 의료, 식음료, 전자 등의 분야에서는 대량의 가스를 요구하고 있다. 각종 가스의 세계시장은 산업의 발달에 따라 지속적으로 증가하고 있으며 그 활용도 역시 증가하고 있다.

화학공정 및 석유정제 분야에서의 가스사용량은 지속적으로 증가하고 있으며, 질소, 산소 뿐만 아니라 특히 공정 중 부산물로 얻어진 막대한 양의 수소를 소비하는 분야이다.

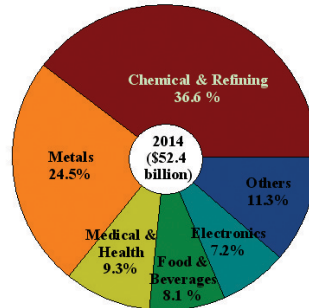
철강산업에서는 광범위하게 사용되는 산소전로(basic oxygen furnace), 전기로 등에서 대량의 산소를 소비하고 있으며, 질소, 아르곤, 수소 등의 가스가 많이 사용되고 있다. 제조공정 및 용접분야에서는 산소, 이산화탄소, 아르곤 등의 가스를 요구한다. 의료분야에서는 산소요법을 위한 산소, MRI 등 첨단영상진단장비용 헬륨이 요구된다. 식음료분야에서는 보관 및 운송과정에서 습기 및 박테리아 등으로부터 내용물을 보호하기 위한 이산화탄소, 질소가스, 유지류 생산공정용 수소 등의 가스가 사용되고 있다. 또한 식음료의 냉동보관을 위해 액체질소, 이산화탄소 등이 사용되고 있다.

전자산업분야에서는 다양한 가스들이 사용되어지고 있는데, 질소, 아르곤, 수소, 산소, 이산화탄소 등이 많이 사용되어지고, 특히 불활성 가스인 질소는 반도체 및 접합공정에서의 차단기체(blanketing gas)로 대량으로 사용되고 있다. 또한 최근 각광을 받고 있는 평판디스플레이, 태양전지 등의 생산을 위한 산업용가스 뿐만 아니라 특수가스의 수요가 증가하고 있다.

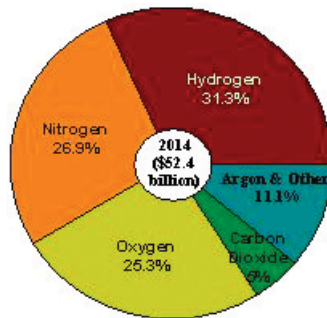
또한 수처리, 제지공정, 유리제조공정 등 다양한 분야에서 대량의 산업용 가스가 사용되어지고 있다.



(가) 산업용 가스의 시장변화



(나) 산업용 가스 소비분야



(다) 산업용 가스의 유형별 소비현황

그림 1. 산업용 가스 시장 현황 [Source : The Freedonia Group, Inc. 2010]<sup>1)</sup>

표 1. 각종 가스의 비체적

	Specific volume (l/kg)			Relative volume (Gas/Liq)
	Liquid (@NBP)	Gas (@101 kPa, 300 K)	Gas (@10 MPa, 300 K)	
Hydrogen	14.115	12218.964	131.141	9.29
Nitrogen	1.241	878.580	8.950	7.21
Oxygen	0.876	768.817	7.431	8.48
Helium	8.003	6153.089	65.198	8.15
Methane	2.368	1531.839	13.302	5.62

이와 같은 산업용가스는 약 70%의 가스가 기체상태로 현장생산 또는 배관에 의해 생산 및 운송되고 있으며, 나머지 가스는 액체의 형태로 생산되어 원격지의 소비처로 운송되어 사용되고 있다. 표 1은 주로 많이 사용되어지는 가스의 액체상태 및 기체상태의 비체적을 나타내고 있다. 수소의 경우 10 MPa의 압축된 기체가 액체에 비해 약 9.3배의 비체적을 나타내고, 질소의 경우 7.2배, 산소의 경우 8.5배, 천연가스의 주성분인 메탄의 경우 약 5.6배의 비체적을 나타내어 동일한 용기 체적일 때 액체가 많은 양의 가스를 운송할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 생산지와 중소규모의 소비지가 지리적으로 분리되어 있는 경우 액체의 수송이 유리함을 알 수 있다. 한편 공기로부터 분리공정을 통해 얻을 수 있는 질소, 산소 등 가스 및 화학공정의 부산물로 얻을 수 있는 수소 등의 가스의 경우 현장생산이 가능하지만 생산지가 세계적으로 제한되어 있는 헬륨, 천연가스의 경우 주로 선박을 통한 운송에 의해 원격지의 소비처로 공급되고 있으며, 이 경우 고압기체수송보다 액체수송이 유리하며, 액체수송을 가능케 하기 위한 대규모의 가스액화플랜트가 요구된다. 본 고에서는 가스액화플랜트 그 중에서도 극저온기술을 활용한 액

화플랜트를 중심으로 고찰하고자 한다.

## 2. 가스액화플랜트

### 2.1 공기분리 플랜트

질소, 산소, 아르곤은 공기의 99%를 구성하는 요소로, 공기분리를 통해 대량의 순수 질소, 산소, 아르곤을 얻을 수 있다. 공기분리는 크게 극저온(Cryogenic) 방법과 비극저온 방법으로 구분된다. 공기분리장치(ASU, Air Separation Unit)의 방식은 최종적인 가스의 순도와 생산량에 따라 결정되며, 고순도의 대량의 가스가 필요한 경우 극저온 방식의 공기분리장치, 저순도의 작은 생산량이 요구되는 환경에서는 비극저온 방법이 주로 사용된다. 비극저온 방법으로는 PSA(Pressure Swing Adsorption)법, 막분리법 등에 의해 공기분리장치가 사용되고 있다.

표 2. 공기분리 기술비교<sup>[2]</sup>

Process	Status	Economic range (sTPD)	Byproduct capability	Purity limit (vol%)	Start-up time
Adsorption	semi-mature	< 150	poor	95	minutes
Chemical	developing	-	poor	99 +	hours
Cryogenic	mature	> 20	excellent	99 +	hours
Membrane	semi-mature	< 20	poor	~ 40	minutes
Ion Transport Membrane	mature	-	poor	99 +	hours

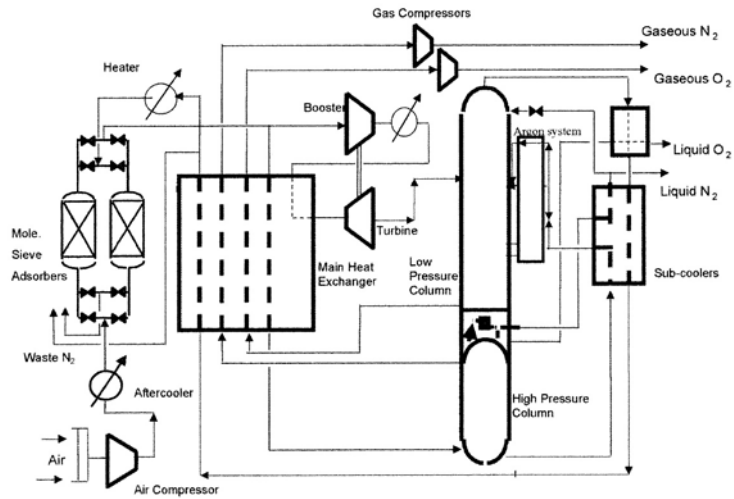
극저온 공기분리장치는 그림 2에 나타낸 바와 같이 공기를 압축하고 전처리공정을 통해 수분, 이산화탄소 등의 불순물을 제거한 후 열교환기를 통한 열교환과 팽창터빈을 통한 팽창을 통해 극저온으로 냉각하고, 증류탑을 통해 순수한 가스로 분리하는 시스템으로, 고순도의 가스를 대량으로 얻을 수 있을 뿐만 아니라 액체를 얻을 수 있는 장점이 있다. 반면 증류탑이 120 K 이하의 극저온으로 운전되기 때문에 모든 저온 구성요소는 콜드박스(cold box) 내부에 설치되어야 하며, 극저온으로 냉각하기 위한 냉각시스템이 요구되어 플랜트의 규모가 크고 복잡하여 투자비가 많이 드는 단점이 있다.<sup>[3]</sup>

공기분리플랜트는 생산하고자 하는 가스의 종류 및 형태에 따라 다양한 공정이 개발되어 왔다. 그림 2의 저압공기 분리 사이클에서 약 6기압 수준으로 압축된 공기는 열교환기를 통해 극저온으로 냉각되고 고압 증류탑의 하부로 공급되어 끓는점의 차이를 이용하여 각각의 가스를 분리하게 된다. 초기의 트레이(Sieve tray)를 대신하여 낮은 압력 손실의 고효율 규칙충전물(structured packing)의 도입함으로써 증류탑에서의 주요한 공정 개선이 진행되었고, 냉동기의 냉동능력을 증대시키기 위해 액체산소의 펌핑을 통해 고압의 공기를 사용하는 공정도 도입된 바 있다.

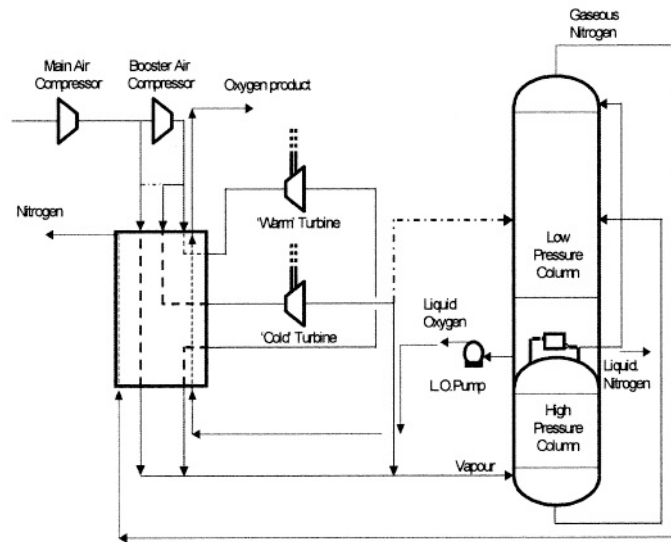
최근 500 ~ 1,200 ton/day의 액체 질소, 액체 산소, 액체 아르곤을 생산할 수 있는 액체 생산용 대형 공기분리플랜트가 설치된 바 있으며, 미국의 경우 평균적인 공기분리플랜트의 규모는 250 ~ 300 ton/day 규모로 알려져 있다.<sup>[5]</sup>

한편 화석연료를 순수산소분위기에서 연소하여 물과 이산화탄소로 구성된 배기가스를 발생시킴으로써 별도의 분리 공정 없이 이산화탄소를 포집할 수 있는 순수산소 연소기술에서 공기분리장치는 핵심적인 구성요소이며, 수천 ton/day 급의 대용량의 공기분리장치를 요구하고 있어, 향후 대형 공기분리플랜트 시장은 지속적으로 증대될 것으로 기대된다.

국내에서도 철강, 화학공장을 중심으로 공기분리플랜트가 도입되기 시작하였으며, 전자, 반도체 산업의 급격한 발전에 힘입어 활발한 공기분리플랜트의 도입이 이루어지고 있으며, 100 여기 이상의 공기분리플랜트가 운전되고 있



(가) low pressure air separation unit



(나) liquid pump plant

그림 2. 극저온 공기분리공정<sup>[6]</sup>

다.<sup>[6]</sup>

## 2.2 헬륨액화플랜트

헬륨(He)은 분자량이 매우 작은 비활성의 기체로, 끓는점이  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 대표적인 극저온 유체의 하나이다. 헬륨은 천연가스유전에서 주로 추출되며, 미국, 러시아, 캐나다, 중국, 폴란드, 카타르, 알제리 등의 국가에 한정되어 분포하는 자원이다. 헬륨은 끓는점이 낮기 때문에 고에너지 입자가속기, 중이온가속기, 자기공명영상장치(MRI) 등의 초전도체의 냉각에 많이 사용된다. 최근 디스플레이산업을 중심으로 헬륨의 수요가 급증하고, 주요 헬륨 생산국의 생산설비들의 노후화로 인해 헬륨의 공급량이 감소하고 있어 헬륨의 가격이 급등하고 있다.

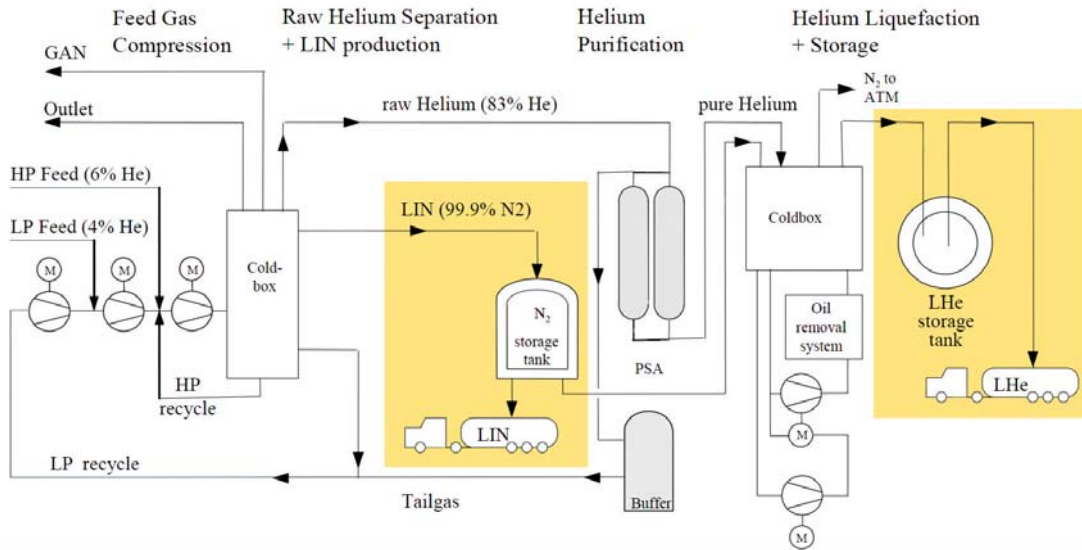


그림 3. 헬륨액화플랜트 PFD<sup>8)</sup>

그림 3은 알제리 Skida의 헬륨액화플랜트의 PFD(Process Flow Diagram)으로, 헬륨이 4% 및 6.4% 포함된 천연가스로부터 액체 헬륨을 생산하는 공정을 나타내고 있다. 2,223 Nm<sup>3</sup>/h(9.5 ton/day)의 액체 헬륨 및 100 ton/day의 액체 질소, 40 ton/day의 기체 헬륨을 생산하는 액화플랜트이다. 천연가스를 3단의 압축기를 통해 압축되며, 콜드박스를 통해 분리된다. 이과정은 천연가스의 액화과정으로, 분리된 헬륨가스는 PSA 설비에 의해 고순도의 헬륨이 추출된다. 고순도의 헬륨가스는 액체 질소에 의해 예냉된 후 5단의 팽창장치를 통해 액화되어 액체 헬륨으로 만들어져 헬륨저장탱크에 저장된다. 헬륨의 수송은 주로 11,000 갤런 이상 급의 규격 헬륨컨테이너를 통해 이루어진다.<sup>9)</sup>

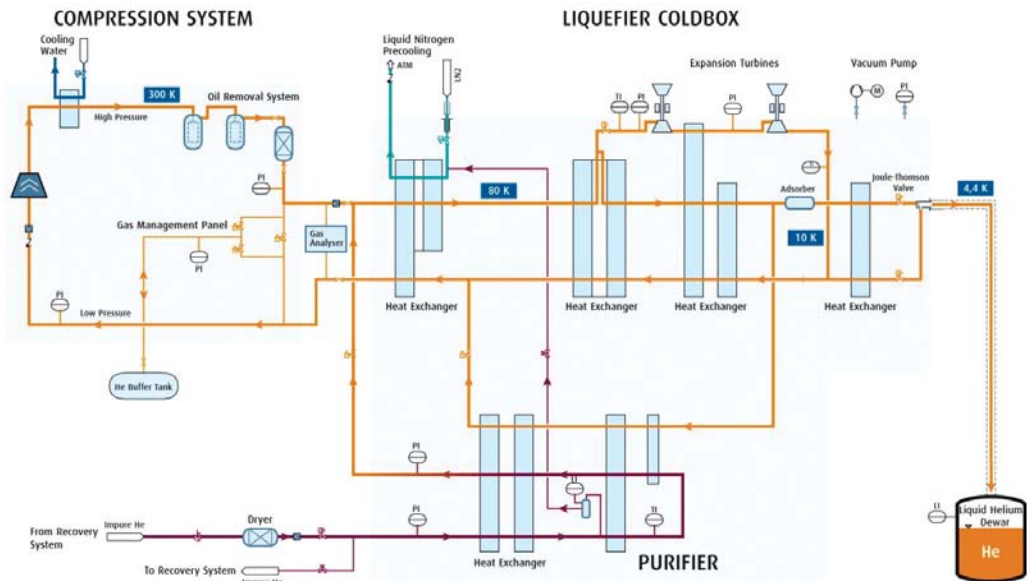


그림 4. 중대형 헬륨액화플랜트 PFD<sup>10)</sup>



헬륨의 주요한 사용처인 초전도체 냉각의 경우 초전도체로부터 열흡수를 통해 증발 또는 승온된 헬륨을 냉각을 통해 재활용하여 헬륨의 소비량을 최소화하기 위해 그림 4에 나타난 바와 같이 소형극저온냉동기 또는 중대형 브레이튼 냉동기를 이용하여 액화 및 재액화를 수행한다.<sup>[10, 11]</sup>

### 2.3 수소액화플랜트

수소는 세계적으로 가장 많은 생산 및 소비를 나타내고 있는 대표적인 산업용가스로, 현재까지는 주로 화학공정의 부산물로 생산된 수소가 생산지 인근의 화학공정으로 공급되어 소비되고 있다.

수소는 연소과정에서 극소량의 NO<sub>x</sub> 발생을 제외하고는 공해물질 및 온실가스가 배출되지 않아, 탄소기반의 에너지 사용으로 인한 환경오염, 에너지 고갈문제를 극복할 수 있는 청정에너지원으로 최근 연료전지, 수소자동차 등이 각광을 받고 있어, 향후 수소의 수요가 크게 증가할 것으로 기대되고 있다. 또한 풍력, 태양열 등의 신재생에너지를 이용한 물의 전기분해에 의한 수소 생산 및 수송을 통한 광역수소에너지네트워크의 구축을 통한 탄소기반 화석에너지로부터 수소기반의 청정에너지로의 전환을 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다.<sup>[12, 13]</sup>

액체수소는 끓는점이 약  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  부근으로 높은 저장밀도를 가지고 있어 로켓엔진, 수소자동차, 잠수함 등의 연료로 사용되며, 1960년대 미국의 아폴로 우주계획의 지원을 위해 대형 액화수소플랜트의 건설이 시작되었다. 2원자 분자인 수소는 o-H<sub>2</sub>와 p-H<sub>2</sub> 수소로 구분되며, 수소분자의 두원자의 스핀이 같은 방향이면 o-H<sub>2</sub>, 반대방향이면 p-H<sub>2</sub> 수소로 구분된다.<sup>[14]</sup> 상온의 수소는 평형상태에서 25%의 p-H<sub>2</sub>, 75%의 o-H<sub>2</sub>로 구성되나, 끓는점( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ )에서는 평형상태에서 99.8%의 p-H<sub>2</sub>로 구성된다. o-H<sub>2</sub>가 p-H<sub>2</sub>로 변화하는 과정은 670 kJ/kg의 열이 발생하는 전환속도가 느린 발열과정으로, 이때 발생하는 열은 증발잠열(448.7 kJ/kg)보다 커 액화를 통해 얻은 액체수소의 증발의 원인으로 작용하기 때문에 안정상태의 액체수소를 얻기 위해서는 액화과정 이전에 높은 온도에서 o-H<sub>2</sub>를 p-H<sub>2</sub>로 변환하는 수소변환을 수행하여야 한다.

현재 세계적으로 최대의 수소액화플랜트는 30 tons/day에 불과하나, 미래의 수소사회를 지원하기 위해서는 300 tons/day 급의 수소액화플랜트가 요구되고 있다.<sup>[15]</sup> 현재 수소액화를 위한 소요동력은 10 ~ 15 kWh/kg(LH<sub>2</sub>)이고, 30 tons/day급 수소액화플랜트의 효율은 38%(% Carnot)에 불과하나 대형의 수소액화플랜트는 팽창터빈 등을 통한 에너지 회수가 가능하기 때문에 운전효율의 향상이 기대되고 있다.

수소액화플랜트는 수소 및 가스압축기/팽창기, 열교환기, 쿨드박스, 밸브 등의 핵심요소기기로 구성되며, 수소의 액화를 위해 다양한 형태의 액화사이클이 적용되어 왔으며, 2 ton/day급의 소형의 경우 액체질소에 의한 에너지를 통한 단순 줄톱슨사이클, 5 ton/day 급에는 복잡한 형태의 복합 줄톱슨 사이클, 대형에는 다단의 질소 에너지를 통한 터보팽창기가 사용되어진다. 액화를 위해 공급되어지는 수소에는 수소의 액화온도 이상의 온도에서 어는 점을 가지는 불순물을 제거(< 1 vppm)하여야 한다.

대형 수소액화플랜트를 위한 사이클은 수소를 냉동사이클의 냉매로 하는 수소 클라우드(Claude) 사이클, 헬륨 브레이크 사이클, 수소와 탄화수소의 혼합물을 냉매로 사용하는 혼합냉매 사이클, 네온 사이클 등이 있으며, 수소 클라우드 사이클이 가장 유망한 것으로 알려져 있다.

그림 5는 중형급 수소 클라우드 사이클 냉동을 이용한 수소액화플랜트의 공정도로, 2 MPa의 압력으로 공급된 고압의 수소가스는 열교환기를 통해 냉각되면서 열교환기 내부의 변환축매에 의해 o-H<sub>2</sub>의 p-H<sub>2</sub>로의 변환이 진행된다. 팽창장치에 의해 팽창되어 액체가 발생하며, 열교환기 8에 의해 탱크에서 증발된 수소가스의 재액화가 이루어진다. 상온으로부터  $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지의 냉각은 액체 질소와의 열교환을 통해 수행되며,  $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $-243\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지의 냉각은 브레이크 사이클을 통해 수행된다. 2 MPa의 고압의 수소가스는 3개의 터보팽창기를 통해 연속적으로 팽창된 후 열교환기를 통해 공급되는 수소가스와의 열교환을 수행된다.  $-243\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하의 온도에서의 냉각은 줄톱슨팽창을 통해 얻은 냉동효과를 통해 수행되며, 팽창된 수소는 열교환기를 통해 공급되는 수소와의 열교환을 수행된 후, 저압 압축기로 공급되어 압축되고, 터보팽창기를 통해 순환된 수소와 더불어 고압압축기로 흡입된다.

액화플랜트의 구성은 왕복동 압축기 및 팽창터빈을 채용한 수소냉각시스템과 알루미늄 재질의 plate-fin 열교환



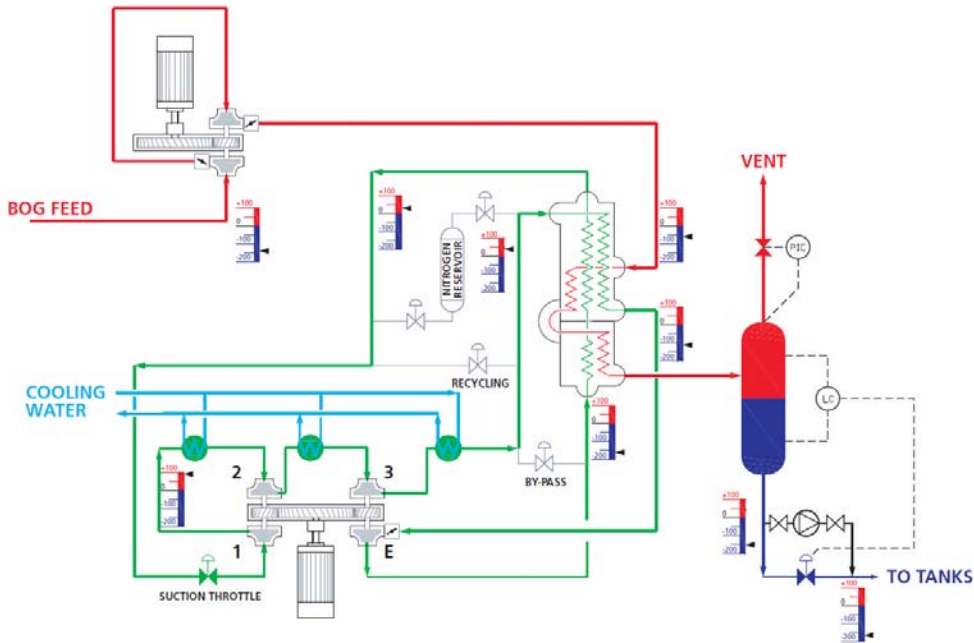


그림 7. LNG 재액화 공정<sup>[2]</sup>

한편 LNG는 LNG 운송선을 통한 운송과정 중 증발이 불가피하게 발생한다. 운송 중 0.1 ~ 0.25 %/Day의 증발이 발생하며, 장시간의 운송 과정중 막대한 양의 증발이 발생한다. 그림 7은 증발된 LNG의 재응축을 위한 재액화공정도(Hamworthy Mark I Reliquefaction System)를 나타내고 있다. 증발된 BOG(Boil-Off Gas)는 3단의 압축기와 팽창기로 구성된 질소냉동사이클에 의해 냉각되어 재액화되어 저장탱크로 이송된다.<sup>[2], 21]</sup>

### 3. 결 론

철강, 반도체, 디스플레이 등의 산업의 발전과 에너지 소비량의 증가로 인해 전세계적으로 질소, 산소, 수소, 천연 가스 등의 가스 수요가 급증하고 있다. 공기분리플랜트, 헬륨액화플랜트, 수소액화플랜트, 천연가스액화플랜트 등의 가스액화플랜트는 대용량의 가스를 효과적으로 이송할 수 있는 고밀도의 액체를 생산하는 플랜트로, 압축기, 열교환기, 팽창기, 콜드박스 등으로 구성되며, 고효율의 가스생산을 위해서는 각각의 가스의 특성에 맞는 최적화된 액화공정으로 구성되어야 한다.

가스액화플랜트는 그 자체로 막대한 부가가치를 창출할 수 있을 뿐만 아니라 관련 기계류의 기술개발을 선도할 수 있는 플랜트로, 국내의 조선 및 플랜트산업 등 관련산업의 경쟁력 제고를 위한 지속적인 연구개발을 기대한다.

### ❁ 참고 문헌

[1] 1.The Freedonia Group, Inc, “World Industrial Gases”, The Freedonia Group, Inc, 2010

[2] A. R. Smith and J. Klosek, “A review of air separation technologies and their integration with energy



- conversion processes”, Fuel Processing Technology 70, pp. 15–134, 2001
- [3] D. R. Vinson, “Air separation control technology”, Computers and Chemical Engineering, Vol. 30, pp. 1436–1446, 2006
- [4] W. F. Castle, “Air separation and liquefaction : recent developments and prospects for the beginning of the new millennium”, Int. J. of Refrigeration, Vol. 25, pp. 158–172, 2002
- [5] J. West, “Considering an Air Separation Unit”, CryoGas International, Jul. 2006
- [6] 문홍만, 박두선, 손무룡, “공기분리기술과 전망”, 화학공업과 기술, 제15권 제3호, pp. 211–217, 1997
- [7] 문홍만, 용평순, 민승환, “가스의 저온분리기술”, 초전도와 저온공학, 제7권 제1호, pp. 3–8, 2006
- [8] P. Froehlich and J. J. Clausen, “Large Scale Helium Liquefaction and Considerations for Site Services For a Plant Located in Algeria”, Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 53, pp. 549–556, 2008
- [9] U. Lindemann, S. Boeck, L. Blum and K. Kurtcuoglu, “Tunkey Helium Purification and Liquefaction Plant for Darwin, Australia”, Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 55, pp. 271–274, 2010
- [10] I. J. Clausen, “Consideration for small to medium liquifaction plants”, Presented at Cryogenic Engineering Conference, 2011
- [11] C. Wang, “Small Scale Helium Liquefaction Systems”, J. of Physics : Conference Series 150, 012053, 2009
- [12] United States Government Accountability Office, “HYDROGEN FUEL INITIATIVE”, GAO–08–305, 2008
- [13] J. M. Ogden, “Hydrogen Delivery Model for H2A Analysis: A Spreadsheet Model for Hydrogen Delivery Scenarios”, DOE Report, Contract number SCM–2–32067–01, 2004
- [14] R. F. Barron, “Cryogenic Systems”, Oxford University Press, New York, 1985
- [15] K. Ohira, “A Summary of Liquid Hydrogen and Cryogenic Technologies in JAPAN’s WE-NET Project”, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 49, pp. 27–34, 2004
- [16] 홍용주, 박성제, 이공훈, 고준석, 염한길, 고득용, “수소액화플랜트”, 기계와재료, 제21권 제1호, pp. 58–67, 2009
- [17] V. V. Belyakov, B. D. Krakovskii, O. M. Popov, G. Kh. Step and V. N. Udu, “Low-Capacity Hydrogen Liquefier with a Helium Cycle”, Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 28 No. 3–4, pp. 150–153, 2002
- [18] 양영명, “가스플랜트 기술개발 사업의 필요성 및 추진방향”, 설비저널, 제 38권 제3호, pp. 4–12, 2009
- [19] J. Kukowski, Y. N. Liu, S. Boccella and L. Kowalski, “Innovations in natural gas liquefaction technology for future LNG plants and floating LNG facilities”, Presented at the Int. Gas Union Research Conf., 2011
- [20] T. N. Anderson, M. E. Ehrhardt, R. E. Foglesong, T. Bolton, D. Jones and A. Richardson, “Shipboard Reliquefaction for Large LNG Carriers”, Presented at 1st Annual Gas Processing Symposium, 2009
- [21] 진영욱, 문정우, 이윤표, 장호명, “LNG 증발기체의 재액화사이클에 대한 열역학 해석”, 설비공학논문집 제19권 제7호, pp. 485–490, 2007



**홍 옹 주**

- 한국기계연구원 극한기계부품 연구본부
- 극한에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : yjhong@kimm.re.kr



**고 준 석**

- 한국기계연구원 극한기계부품 연구본부
- 극한에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : jsko@kimm.re.kr



**김 효 봉**

- 한국기계연구원 극한기계부품 연구본부
- 극한에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : hyobong@kimm.re.kr



**박 성 제**

- 한국기계연구원 극한기계부품 연구본부
- 극한에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : sjpark@kimm.re.kr