1
극저온 냉동기의 활용 사례 및 개발 동향

저자 : 박근석 첨단기계 PD / KEIT
고준석 책임연구원 / 한국기계연구원

요약

- 극저온은 일반적으로 120K(-153℃) 이하의 매우 낮은 온도를 의미하며, 극저온 냉각을 위해서는 극저온 냉동기가 요구된다. 냉각온도가 낮아질수록 열역학 원리와 기술적인 이유로 극저온 냉동기의 성능계수는 기하급수적으로 낮아진다. 만들기도, 유지하기도 어려운 극저온이 왜 필요한지 살펴볼 필요가 있다.

- LNG, 질소, 산소, 수소, 헬륨 등의 가스 액화, 초전도기기, 양자컴퓨터, 군사 및 우주용 검출기, 인류 궁극의 에너지원인 핵융합 발전 등 미래 사회의 유망한 기술에는 극저온 냉각기술이 필수로 요구된다.

- 이러한 극저온 냉동기술은 다양한 미래 유망 기술에서 필수적인 핵심 기술로 냉각온도가 낮아질수록 그 기술적 난이도가 높아지기 때문에 지속적인 연구개발을 통해 기술을 축적하고 다양한 산업 분야에 활용될 수 있는 제품의 개발이 뒷받침되어야 한다.

- 본고에서는 다양한 극저온 냉동기의 활용 사례를 살펴보고, 산업 관점에서 중장기적으로 시장이 확대될 것으로 전망되는 극저온 액화 및 재액화시스템에 대한 내용을 살펴보고자 한다.

- 우선, 바이오산업과 정밀가공 분야를 중심으로 수요가 증가하고 있는 액체질소는 공급 체계에서의 손실 저감과 안정성 확보 및 산업의 활성화를 위해 기존의 대용량 플랜트 중심의 공급 체계에서 현장 생산 액체질소 공급 체계로 전환할 필요가 있다.

- 또한, 점점 도래하고 있는 수소에너지 사회에서 액체수소 충전소의 보급 확산이 확실시되며, 안정적이고 손실 없는 액체수소 저장을 위한 수소 재액화용 극저온 냉동기의 개발이 요구된다.

- 극저온 냉동기 및 냉각기술은 미래 사회에서 유망 산업의 기반을 제공하는 활성화 기술(enabling technology)이며, 퍼스트 무버로 전환하기 위해서도 필수로 확보되어야 할 기술이다.

1 극저온 냉동기의 개념 및 종류

- 극저온은 일반적으로 120K(영하 153℃) 이하의 온도를 의미하며, 이러한 낮은 온도를 얻기 위해서는 에어컨, 냉장고, 냉동고 등 상온 냉동기와는 다른 작동 방식의 냉동기가 필요하며, 이를 극저온 냉동기(Cryocooler)라고 한다.

- 냉동기는 냉매의 압축→냉각→팽창→가열 과정을 반복하면서 냉각온도로부터 열을 흡수하여 대기 중으로 방출하는 원리로 작동한다. 냉매의 팽창 과정을 통해 얻을 수 있는 강온효과는 물리적으로 수~수십℃로 제한되기 때문에 대기보다 150℃ 이상의 온도 차를 얻기 위한 극저온 냉동기는 고압과 저압의 냉매가 서로 열교환이 이루어지는 과정이 필수로 요구된다. 또 극저온 냉동기에서 사용 가능한 냉매는 헬륨, 네온, 질소, 공기 정도로 제한되기 때문에 줄-톰슨 팽창 원리를 이용하는 상온 냉동기와는 다른 방식과 형태의 팽창기구가 필요하다.

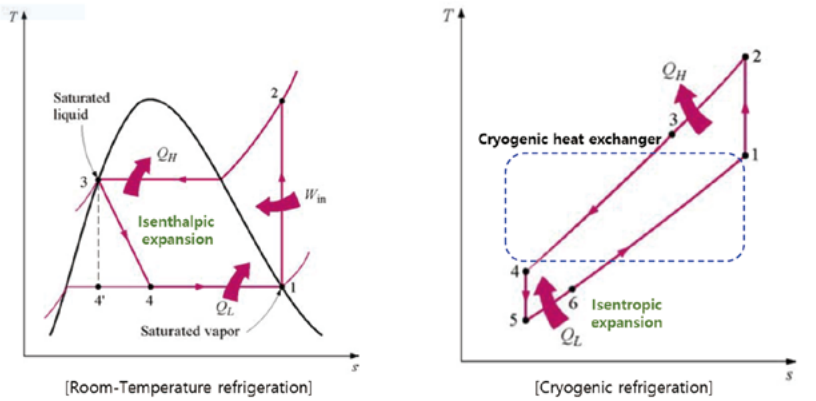


그림 1. 상온 냉각과 극저온 냉각의 냉각 사이클 T-S 선도 비교

- 냉각은 에너지를 투입하여 낮은 온도로부터 대기 중으로 열을 뽑아내는 것인데, 냉각온도와 주위온도가 결정되면 카르노 효율(Carnot COP)이 결정된다. 또한 냉각온도가 낮을수록 손실이 증가하여 실제 효율은 더욱 낮아진다. 그림 2는 300K(23℃) 주위온도 조건에서 냉각온도에 따른 카르노 효율과 % Carnot COP를 나타낸 그래프다.

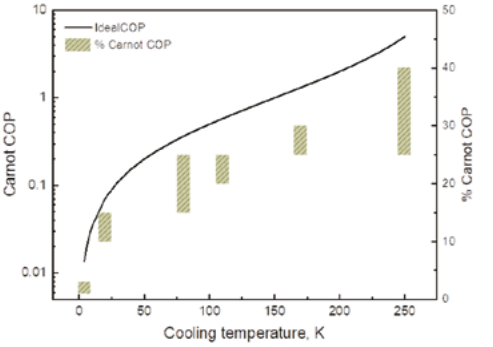


그림 2. 냉각온도에 따른 카르노 효율 및 % Carnot COP(TH=300K 기준)

- 냉각온도가 낮아질수록 카르노 효율은 기하급수적으로 감소하여 250K(-23℃)에서는 5.0인 수치가 150K에서 1.0으로 낮아지게 되며, 액체헬륨의 온도인 4.2K 냉동기의 경우 0.0142에 불과하다. 현재 개발된 극저온 냉동기의 성능 사양을 분석해 보면 % Carnot COP 또한 냉각온도가 낮아질수록 감소한다. 상온 냉동기는 25~40% 수준이고, 액체헬륨의 온도인 4.2K에서는 수 % 수준으로 급감한다.

- 상온 냉각에서는 성능계수(COP)가 기본적으로 1 이상의 값을 갖지만, 극저온 냉동기의 성능계수는 액체질소의 온도인 77K에서는 0.1 이하, 액체수소의 온도인 20K에서는 0.02 이하, 액체헬륨의 온도인 4.2K에서는 0.001 이하로 매우 낮은 효율을 보인다. 극저온 냉각기술을 활용하고자 한다면 냉각을 위해 매우 많은 에너지가 필요하다는 점을 고려하여야 한다.

- 극저온 냉동기는 상온 냉동기와 달리 목표로 하는 냉각 성능(온도 및 용량)에 따라 그림 3과 같이 적합한 냉각방식이 있다. 본고에서는 산업적으로 유용한 방식인 브레이튼(Brayton), G-M(Gifford-McMahon), 스털링(Stirling) 극저온 냉동기에 대해서 살펴보고자 한다. 냉각용량 기준으로 대용량은 플랜트 형태의 브레이튼 냉동기가 적합하며, 중소형으로는 G-M 냉동기와 스털링 냉동기가 적합하다. 작동 방식의 특성을 이유로 액체질소의 온도인 77K을 기준으로 낮은 온도에는 G-M 냉동기가, 높은 온도에는 스털링 냉동기의 활용도가 높다.

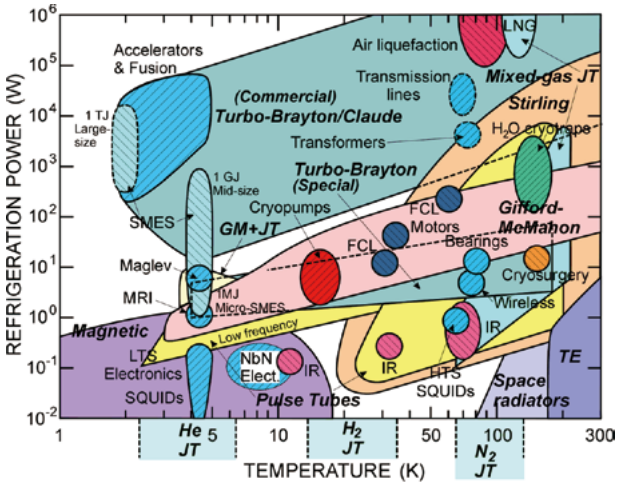


그림 3. 냉각온도 및 냉각용량에 따른 극저온 냉동기의 종류[1]

- 브레이튼 냉동기는 압축기, 열교환기, 팽창기, 콜드박스 등의 핵심 부품으로 구성되어 플랜트 형태를 가지며, 대용량 냉각 수요에 대응한다. 주로 가스산업에서 수소, 헬륨, LNG 등의 액화 혹은 재액화를 위한 목적으로 활용된다. 브레이튼 냉동기는 모든 대용량 극저온 냉각 플랜트의 가장 기초가 되는 형태이기 때문에 원천기술을 확보하는 것이 중요하다.

- 브레이튼 극저온 냉동기를 포함한 대용량 극저온 냉각 플랜트산업을 활성화하기 위해서는 극저온 냉각 시스템에 적용을 목적으로 하는 터보 기계 방식의 압축기와 팽창기, 고효율 열교환기 제조 기술이 우선되어야 한다.

- 대형 극저온 냉각 플랜트의 선도기업은 Air Liquide(佛, 레르리키드)와 Linde(獨, 린데)가 있다. 유럽 대륙의 두 기업은 산업용 가스 생산을 위한 액화공기 분리 플랜트와 입자가속기용 헬륨 액화 플랜트 기술을 시작으로 전 세계 극저온 냉각 플랜트 시장을 양분하고 있다. Linde는 최근 수소 액화 플랜트에 집중하고 있으며, Air Liquide는 부분 제품화를 통한 브레이튼 냉동기의 보급 확대에 주력하고 있다. 규제 강화에 따라 LNG 추진 선박이 증가함에 따라 LNG 증발 기체를 재액화하는 수요가 증가하였고, Air Liquide는 빠른 대처로 TBF 시리즈를 제품화하고 LNG 재액화 시장을 선점했다. 국내 조선사에서 제작하는 LNG 선박에는 대부분 TBF 제품이 탑재되고 있다. Air Liquide는 TBF 시리즈의 성공을 바탕으로 초전도 모터 냉각을 위한 20~80K 터보-브레이튼 냉동기, 대용량 양자컴퓨터용 냉각 시스템 개발 등 응용 분야를 중심으로 한 제품 개발에 집중하고 있다.

그림 4. Turbo-Brayton(TBF-350, Air Liquide)

- G-M 극저온 냉동기가 활용되는 주요 분야는 반도체 제조장비에서 초고진공 분위기 조성을 위해 사용되는 크라이오 펌프(Cryo Pump) 시장이다. 현재는 ULVAC(日), SHI(日), Edwards-CTI(美) 등에 의해 대부분 시장이 점유되고 있으며, 국내 제조사인 Cryo H&I가 시장 진입을 위해 노력 중이다.

- 크라이오 펌프 시장 외에 규모가 큰 시장은 형성되어 있지 않지만, 최근 극저온 응용기술에 대한 관심이 증가하면서 G-M 극저온 냉동기에 대한 제품과 개발 수요가 증가하고 있다. 현재 제품 형태로 판매 중인 극저온 냉동기는 대부분 G-M 냉동기이기 때문이다.

- G-M 극저온 냉동기는 냉각온도를 기준으로 액체질소(77K), 액체수소(20K), 액체헬륨(4.2K)에 대응하는 제품군으로 분류할 수 있다. G-M 극저온 냉동기의 선도기업으로는 Cryomech(美), SHI(日) 등이 있다. 두 기업 모두 다양한 냉각 성능과 형상의 모델 라인업을 갖추고 있어서 초전도, 액체수소, 양자컴퓨터 등 첨단 분야의 연구개발에 우선 활용되고 있다.

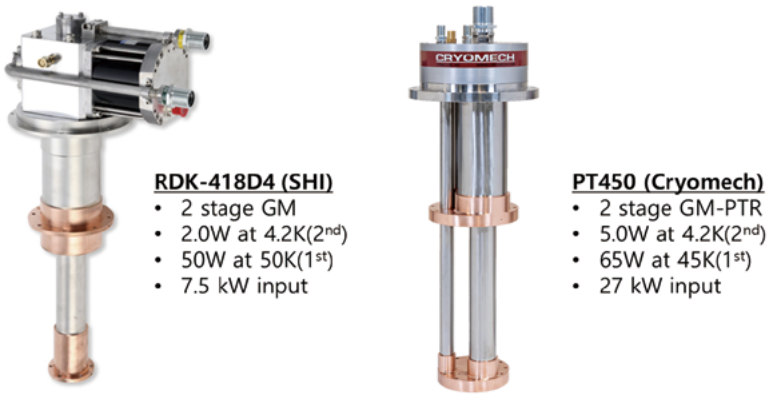


그림 5. G-M 극저온 냉동기의 상용 제품(4.2K 냉각용)

- 스털링 냉동기는 소형화가 가능하고 냉각속도가 빠를 뿐 아니라 용량 제어가 가능하다는 장점이 있어 주로 검출기 센서 냉각을 위한 특수 목적으로 개발되어 왔다. 기술 개발의 난이도가 높아 상용제품으로 개발된 사례는 많지 않으나, G-M 극저온 냉동기에 비해 효율과 크기 면에서 탁월하기 때문에 냉각온도 50K 이상의 영역에서는 제품화 관련 시장의 반응이 좋을 것으로 기대되는 냉동기 형태다.

- 현재 상용제품으로 사용할 수 있는 스털링 냉동기는 Stirling Cryogenics(和)의 제품이 거의 유일하다. 하지만 이 제품은 크랭크-캠 구동 방식으로 윤활유를 사용함에 따라 유지보수 기간이 6,000시간으로 짧아 오일을 사용하지 않는 방식의 스털링 냉동기 제품이 개발된다면 시장 경쟁력이 높을 것으로 판단된다. 현재는 대체품이 없는 관계로 분산형 가스 액화 시스템과 초전도 전력기기 등 브레이튼 냉동기를 적용하기 어려운 분야에 사용되고 있다.

- Stirling Ultracold(美)는 선형압축기 구동 방식의 스털링 냉동기를 이용해 바이오 시약의 안정적 보관을 위한 초저온 냉동고 제품을 개발했다. 기존의 증기-압축 냉각방식을 이용한 초저온 냉동고에 비해 친환경 냉매 적용, 높은 에너지 소비 효율 등으로 주목을 받고 있다.

그림 6. 스털링 냉동기(SPC-4)

그림 7. 초저온 냉동고(SU780XLE)

2 극저온 냉동기의 응용 분야 및 시장

- 상온 냉각기술은 주로 특정 공간의 온도를 낮추는 목적으로 사용되고, 거대 산업군을 형성하고 있는 증기-압축 냉각방식에 기반한다. 반면에 극저온 냉각기술의 응용 분야는 냉각온도에 따라 다양한 분야에 적용되며, 요구되는 냉각온도와 냉각용량에 따라 다양한 방식의 냉동기가 사용된다. 그림 8은 냉각온도에 따른 응용 분야를 정리한 것이다.

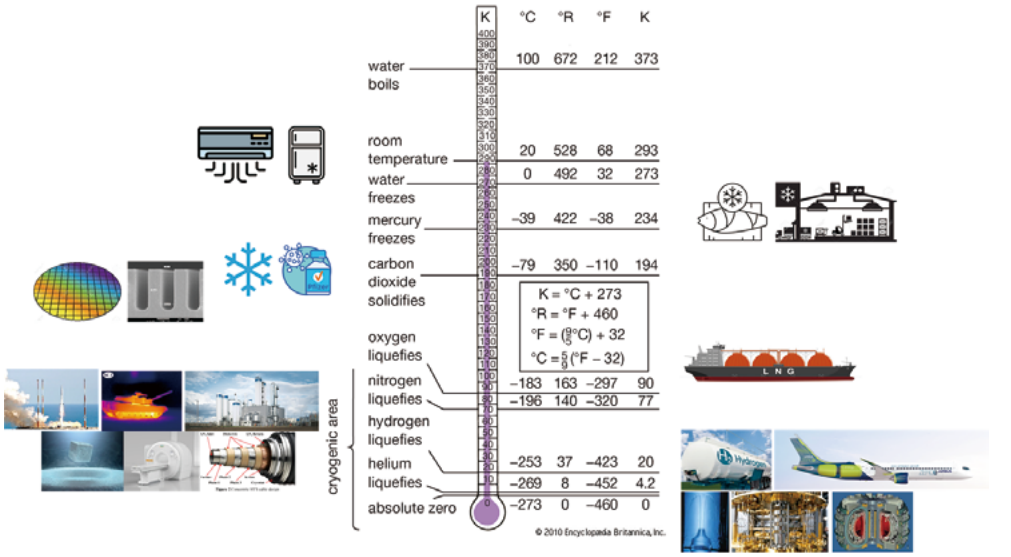


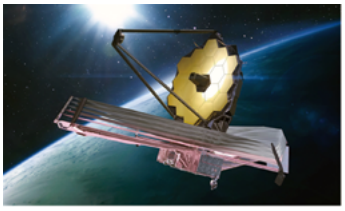
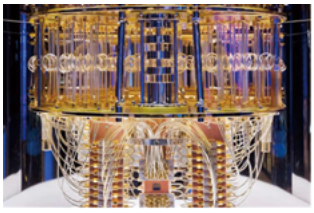
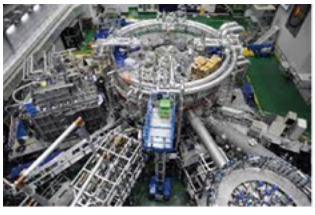
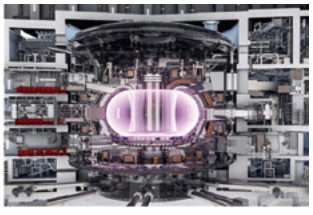
그림 8. 극저온 냉각기술의 응용 분야

- 극저온 냉각기술 개발을 촉진해 온 분야는 가스·우주·초전도산업 분야로, 지금까지의 극저온 냉각기술은 수요자 중심으로 기술 개발이 이루어져 왔다. 크라이오 펌프용 극저온 냉동기와 군수용 극저온 냉동기를 제외하고는 양산 수량이 많지 않아 제품 단위의 시장 규모가 크지 않다. 특히 극저온 냉동기에 대한 수요자의 요구 사양은 냉각온도, 냉각용량, 제약 조건 등에서 매우 넓은 분포를 보인다.

- 가스산업에서 극저온 냉각기술은 기체 액화를 주목적으로 활용된다. 액체는 기체에 비해 체적이 수백 배 감소하기 때문에 대용량 저장 및 운송을 위해서는 액화가 필수적이다. 현재 비교적 청정 연료로 분류되는 LNG, 주로 산업가스로 사용되는 액체질소, 미래 청정 에너지원으로 주목받는 수소, 입자가속기, 양자컴퓨터와 같은 미래 기초 연구에 필수인 헬륨의 액화 온도는 각각 110K, 77K, 20K, 4.2K으로, 액화온도까지 냉각이 가능한 극저온 냉각기술이 필요하다. 또 극저온 유체는 단열기술을 적용하더라도 이송 및 저장 중에 외부의 열침입으로 인해 기체 증발이 발생하기 때문에 재액화를 위한 극저온 냉각기술도 요구된다.

- 전통적 산업인 가스산업 외에 미래 유망 기술로 주목받는 분야는 대부분 극저온 냉각에 기반하며, 간략히 표로 정리하면 다음과 같다.

표 1. 미래 유망 분야의 극저온 냉각기술 응용

적용 분야	용도	적용 사례
우주/국방	검출기 냉각 ZBO 저장	· 적외선검출기 센서 냉각 · 허블, 제임스웹 우주망원경용 검출기 냉각 · 액체수소/액체산소 무손실 저장 · 전차 및 감시초소용 적외선 열영상 센서 냉각 
초전도	초전도체 냉각	· 초전도 전력기기(케이블, 한류기, 변압기)의 냉각 시스템 · MW급 초전도 풍력발전기 · 고자기장 분석기기(NMR, MRI)의 냉각 · Zero emission 선박 및 항공기용 초전도 추진모터
양자컴퓨터	절대영도 냉각	· 양자컴퓨터용 mK(밀리켈빈) 극저온 냉각 · 4K 극저온 냉동기 기반 희석식 냉동기 
핵융합 발전	토카막 냉각	· 핵융합로(KSTAR, ITER)의 초전도 자석 냉각  

• 극저온 냉동기의 세계 시장은 2020년 23억 달러 규모에서 CAGR 6%로 성장하여 2025년에는 31억 달러 규모로 전망되며, 국방, 상용, 의료, 연구개발 분야에 주로 적용되는 것으로 분석된다. 국방 분야에서는 적을 탐지하기 위한 적외선 열영상 센서 냉각용으로 적용되며, 상용 분야로는 반도체, 디스플레이 제조 장비에서 고진공 펌프로 활용되는 크라이오 펌프 제품에 적용된다. COVID-19 감염병 사태와 삶의 질 향상을 위한 의료·바이오산업의 확산으로 의료 분야에서의 활용도 증가가 예상된다.
또한 양자, 초전도, 우주와 같은 미래산업을 위한 연구개발 목적의 극저온 냉동기 활용 증가도 전망된다.

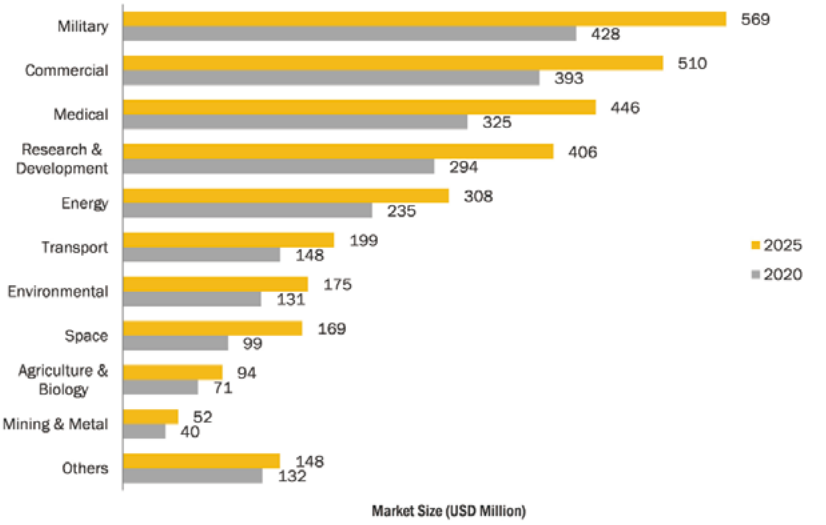


그림 9. 극저온 냉동기의 응용 분야별 시장 전망

• 극저온 냉동기는 다양한 미래산업을 가능케 하는 핵심 기반기술로, 본고에서는 산업 관점에서 중장기적으로 시장이 확대될 것으로 전망되는 극저온 액화 및 재액화 시스템에 대한 내용을 살펴보고자 한다.

3 극저온 냉동기를 활용한 액체질소 생산기술 및 재액화기술

• 액체질소는 바이오산업 및 제조 분야에서 극저온 냉각을 위해 산업 현장에서 소비가 많은 극저온 유체다. 지금까지는 주로 대형 액화공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)에서 생산되는 액체질소를 트레일러로 운반하여 바이오기업 등 사용 현장에 액체질소 탱크로 공급하는 체계로 소비되었다. 기존의 공급 체계에서는 액체질소의 이송 및 저장 과정에서 필연적으로 손실이 발생하고, 운송 및 취급 인력에 대해 극저온의 액체질소가 노출되기 때문에 안전 문제가 제기되었다.

• 많은 바이오기업 및 정밀가공기업의 액체질소 소비량은 수십~수백 L/Day 규모이고, 소비량이 일정하지 않다는 특징이 있어 대형 플랜트 중심의 공급 체계보다 사용 현장에서 직접 생산하여 소비하는 체계를 구축하는 것이 자원의 효율성과 산업안전 측면에서 유리하다. 이를 해결할 수 있는 기술이 극저온 냉동기를 이용한 액체질소 생산 시스템이다.

그림 10. 액체질소 사용 현장인 바이오기업(左)과 정밀가공기업(右)

- 액체질소의 원료인 공기는 원료비가 발생하지 않으면서도 무한하고 지리적 제약이 없다. 그림 11과 같이 구성되는 극저온 냉동기 적용 액체질소 생산 시스템은 원료인 공기에서 전처리 과정을 통해 불순물과 수분을 우선 제거하고, 압력 변동 흡착 방식 또는 멤브레인 방식으로 질소와 산소를 분리한다. 분리된 기체질소는 질소의 액화온도인 77K까지 냉각되어 액화된 후 액체질소 탱크에 저장된다. 진공 단열한 액체질소 저장탱크에도 열침입은 필연적으로 발생하기 때문에 기체 증발이 발생하며, 이는 극저온 냉동기를 이용해 재액화되어 손실 없는 저장이 가능하다.

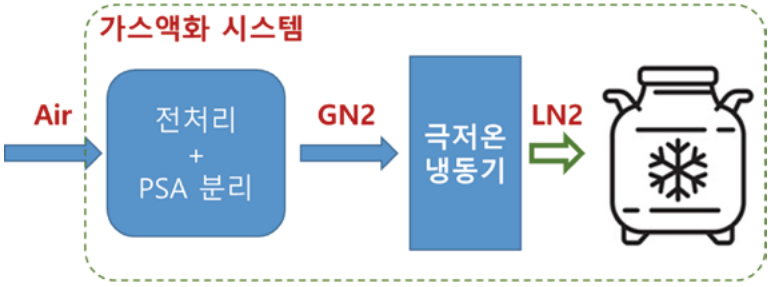


그림 11. 현장설치(On-site) 액체질소 생산 시스템의 개략도

- 수백 L/Day급의 액체질소 생산을 위한 극저온 냉동기는 액체질소 온도인 77K에서 수백 W의 냉각용량이 요구되며, G-M 냉동기 혹은 스털링 냉동기 방식이 적합하다. G-M 냉동기는 Cryomech(美), Sumitomo(日)와 같은 해외 선진기업에서는 다양한 모델이 제품화되어 있고 현재 기준으로 산업군이 형성되어 있으므로 액체질소 생산 시스템에 우선 적용하는 것이 바람직하다. 선형압축기 구동 방식의 스털링 냉동기는 냉동기의 효율이 높고 용량 제어가 가능하다는 장점이 있으나, 상용화 기술 수준이 낮아 미래 시장을 대비하기 위한 냉동기 개발에 집중할 필요가 있다.

- 자체 개발한 G-M 극저온 냉동기를 이용한 액체질소 생성기(Liquid nitrogen generator) 기술을 보유한 기업은 Cryomech(美)이 유일하며, 최대 120L/Day 용량을 기본 모듈로 하여 병렬연결을 통해 더 큰 용량을 가진 생산 모델의 공급이 가능하다.

그림 12. 액체질소 생성기 제품(LNP120, Cryomech)

- 액체질소는 식음료, 의약, 수송, 전기전자, 석유화학, 제조 분야 등에 사용되며, 소비량은 2024년 1.26억 톤에서 연평균 4.75%씩 증가하여 2029년에는 1.59억 톤까지 증가할 것으로 전망된다. 적용 분야 가운데 의약과 제조 분야는 현장생산 액체질소 생성기에 대한 수요가 높을 것으로 기대된다.

- 세계 시장 규모는 의약 분야에서 성장률 증가가 가장 높을 것으로 전망되며, 제조와 의약 분야는 2021년 12.1억 달러에서 2026년 15.5억 달러까지 증가할 것으로 전망된다.

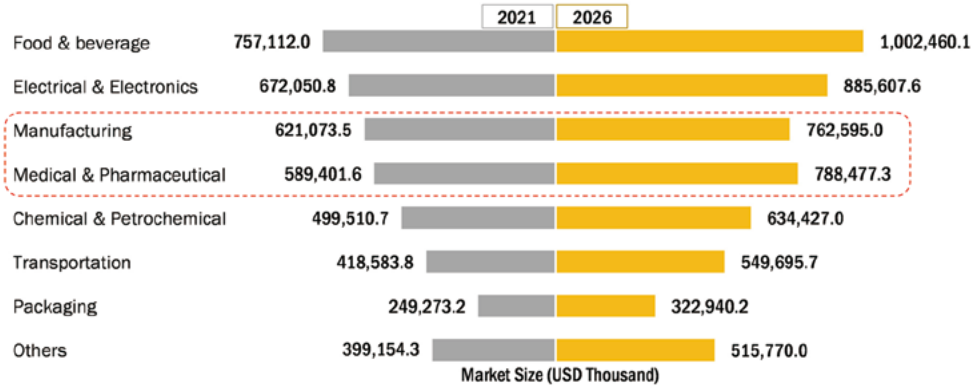


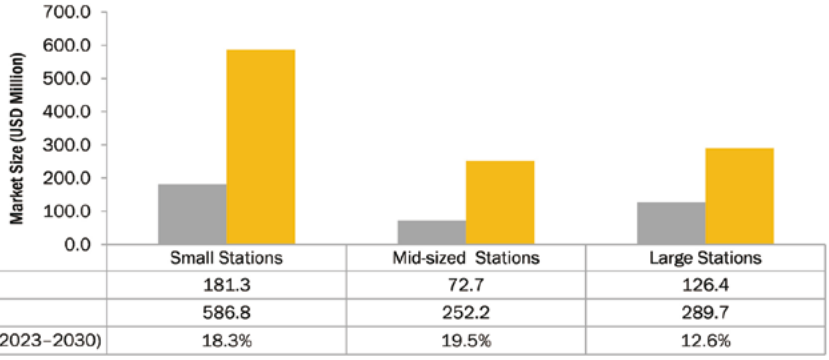
그림 13. 사용 분야별 질소 시장 규모의 전망

- 현장생산을 위한 액체질소 생성기는 생산 용량에 맞는 극저온 냉동기의 개발이 필수 조건이며, G-M 냉동기와 스털링 냉동기 방식으로 냉각용량을 최대화하는 기술의 개발이 요구된다. 시스템 측면에서 액체질소는 쉽게 증발되어 압력에 의한 폭발 위험이 있기 때문에 가스 안전을 고려한 개발이 이루어져야 하며, 주로 의약 분야 적용을 목적으로 하기 때문에 GMP(Good Manufacturing Practice) 인증도 개발 단계에서 고려되어야 한다.

4 극저온 냉동기를 활용한 액체수소충전소의 재액화기술

- 액체수소는 탄소중립사회 실현을 위한 미래 모빌리티와 중장비 연료로서 가장 유력한 에너지원이다. 정부는 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 달성을 위해 2030년까지 수소충전소 660개소 보급을 목표를 수립하였으며, 이후에도 지속적인 보급 확산이 전망된다.

- 수소충전소의 시장 규모는 2023년 3.8억 달러에서 연 16.8%의 성장률로 2030년에는 11.3억 달러로 급격히 성장할 것으로 전망된다. 충전소 규모로 볼 때 수소 모빌리티의 확산에 따라 지역적으로 넓게 분포할 수 있는 중소 규모 충전소의 보급과 확산이 예상되며, 지역적으로는 아시아가 수소 인프라 보급을 주도할 것으로 전망된다.



	Small Stations	Mid-sized Stations	Large Stations
2023	181.3	72.7	126.4
2030	586.8	252.2	289.7
CAGR (2023-2030)	18.3%	19.5%	12.6%

그림 14. 규모에 따른 수소충전소 시장 전망

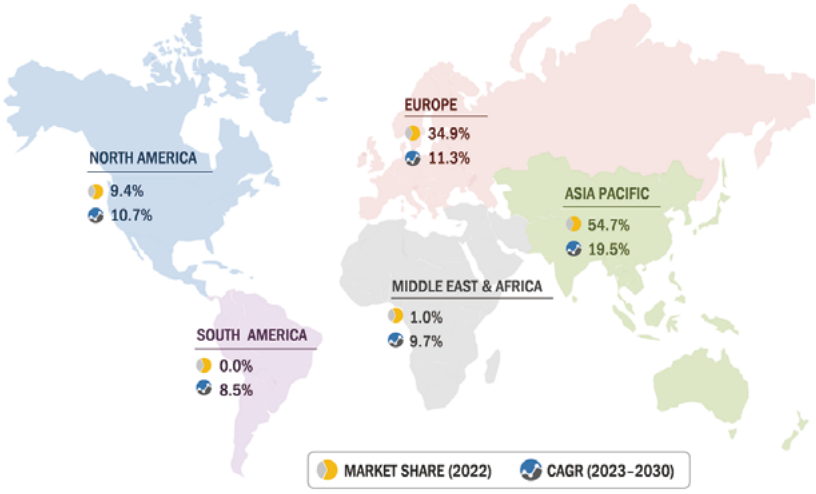


그림 15. 수소충전소의 지역별 점유율 및 성장률

- 상압, 상온에서는 수소의 밀도가 매우 낮아 연료로 활용하기 위해서 저장 밀도를 높이는 것이 필요하다. 승용 모빌리티에는 700기압 이상의 고압 기체로 저장하는 방식이 유력하고, 철도, 선박, 항공, 상용 모빌리티에는 액체수소로 저장하는 방식이 선호된다.

- 수소 모빌리티를 위해 국내외 모빌리티 선도기업들은 액체수소를 연료로 하는 트럭, 트램, 항공기, 선박 상용화를 위한 연구개발을 적극적으로 진행 중이다.

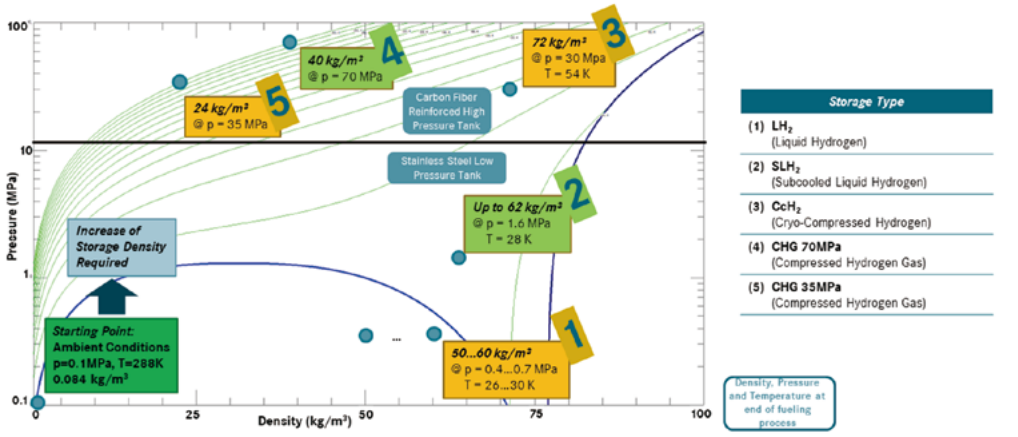


그림 16. 수소 저장 방식에 따른 밀도-압력 다이어그램

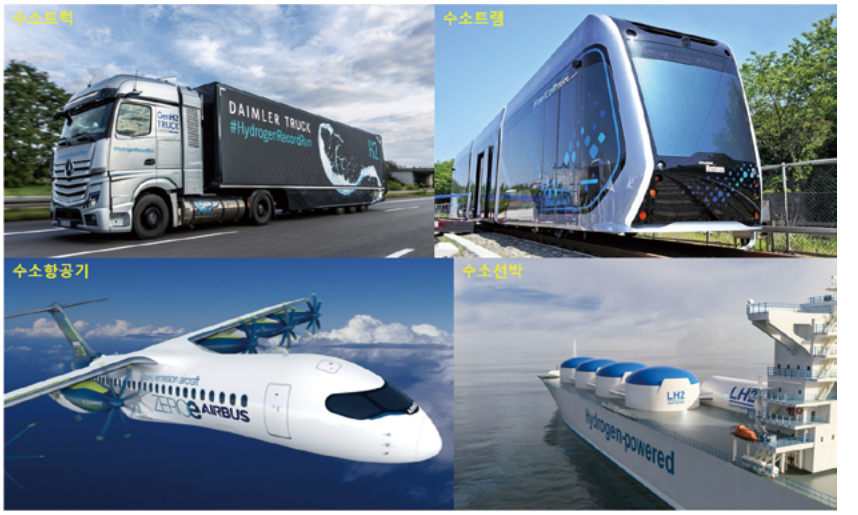


그림 17. 액체수소 탑재 모빌리티(트럭, 트램, 항공기, 선박)의 예시

- 수소충전소에는 저장 밀도와 안전을 이유로 20K인 액체수소로 저장하는 방식이 적합하며, 저장 탱크의 단위 규모는 10~100m3 범위에서 규격화될 가능성이 높다. 수소충전소는 액체수소 생산 플랜트나 저장 기지로부터 트레일러 이동을 통해 공급받으며, 액체수소를 안정적이고 손실 없이 저장하기 위해서 20K 냉각온도에서 수십~수백 W의 냉각용량을 갖는 극저온 냉동기가 요구된다.

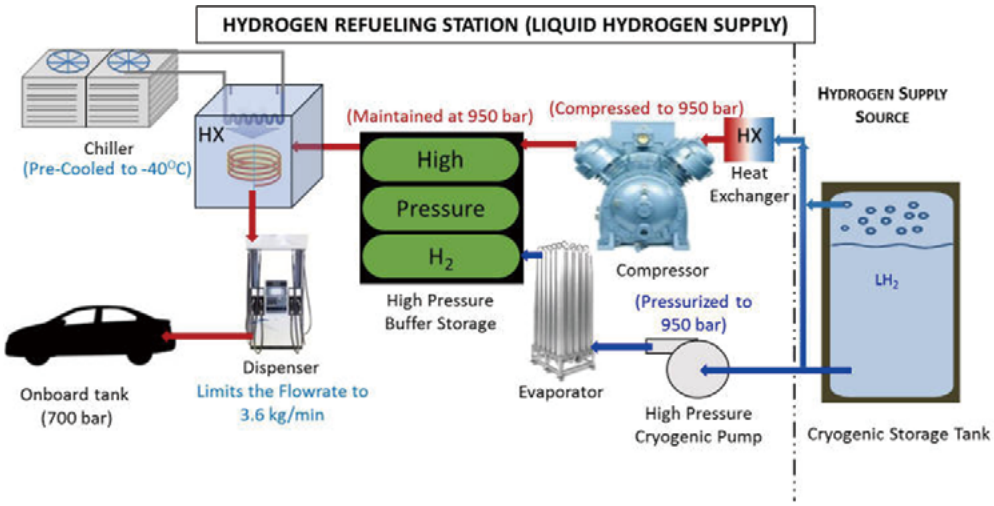


그림 18. 액체수소 기반의 수소충전소 개념도

- 액체수소의 재액화나 과냉각을 위한 극저온 냉동기는 냉각용량에 따라 G-M 극저온 냉동기와 브레이튼 사이클로 작동하는 헬륨 냉동기가 적용될 수 있다. 액체수소 저장 탱크 용량이 20m3 이하인 경우에는 20K에서 100W 냉각용량까지 가능한 G-M 극저온 냉동기가 적합하며, 그 이상의 저장 탱크에 대해서는 더 큰 냉각용량을 얻을 수 있는 헬륨 냉동기를 적용하는 것이 바람직하다.

그림 19. 수소 재액화용 극저온 냉동기

- 국내에서는 액체수소 재액화에 적용할 수 있는 수준의 극저온 냉동기 기술이 확보되지 않아 수소에너지 사회를 대비하기 위해서는 개발이 시급하다. 특히 폭발 위험이 있는 수소 시스템에 적용하기 위해서는 개발 단계에서부터 방폭 기술이 고려되어야 한다.

5 결론 및 시사점

- 극저온 냉각기술은 수소, 양자, 우주, 초전도, 핵융합 등 미래기술을 가능케 하는 활성화 기술(enabling technology)이며, 다양한 냉각온도 및 냉각용량의 극저온 냉동기 기술을 확보할 필요가 있다. 극저온 냉각의 기반기술을 보유하고 있는 미국, 일본, 유럽을 중심으로 이러한 미래 선도기술 개발이 시작되는 이유이기도 하다.

- 국내에서도 극저온 냉각기술을 이용하는 다양한 미래기술의 개발 연구가 시도되었지만, 한정된 시간과 재원을 이유로 기반이 되는 극저온 냉동기 개발은 고려되지 않아 현재 대부분 극저온 냉동기는 수입에 의존하고 있다.

- 다양한 극저온 응용 분야 가운데 현장생산이 가능한 액체질소 생산 시스템과 액체수소충전소에서 무손실 저장을 위한 재액화 시스템 기술은 산업 파급 효과가 클 것으로 전망되며, 이를 위한 극저온 냉동기 개발을 통해 국내 극저온 냉각기술 자립화를 위한 교두보로 활용할 필요가 있다.

출처 및 참고자료

1. “Cryocoolers: the state of the art and recent developments”, Ray Radebaugh(2009), Journal of Physics: Condensed Matter, 21. 164219.
2. “Conceptual Design and Development History of the MIRI Cryocooler System on JWST”, R.G. Ross, Jr.(2022), Cryocoolers 22, International Cryocooler Conference.
3. “A review on a 4K cryogenic refrigeration system for quantum computing”, Jiho Park, et al.(2022), Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol.24 No.2, pp. 1-6.
4. “Superconducting technologies for renewable energy”, K. Kovalev, et. al.(2019), E3S Web of Conference 124, 01043.
5. "F1. Review of Refrigeration Methods”, Ray Radebaugh(2020), Handbook of Superconducting Materials, Taylor and Francis Books.
6. “Cryocooler market – forecast to 2025”, MarketsAndMarkets.
7. “Industrial nitrogen generator market - forecast till 2026”, MarketsAndMarkets.
8. “Hydrogen fueling station market - forecast to 2030”, MarketsAndMarkets.