

Joule-Thomson 냉동기와 혼합 냉매 (Joule-Thomson Refrigerator and Mixed Refrigerant)

황 규 완, 인 세 환, 정 상 권
한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

Joule-Thomson (J-T) 냉동은 고압의 기체를 저압으로 자유 팽창시킬 때 발생하는 J-T 효과를 이용해 낮은 온도를 얻는 방법이다. J-T 냉동기는 그 구조가 간단하고 기계적 진동이나 마찰을 발생시키는 부분이 없어 오랜 시간 동안 안정적으로 작동할 수 있다는 장점이 있어 소형 시스템의 냉각에 많이 사용된다. 하지만 J-T 냉동기는 J-T 팽창 (J-T expansion) 과정의 비가역성에 의해 내부적으로 많은 엔트로피를 생성하게 된다. 이 때문에 팽창기 (expander) 를 사용해서 기체를 팽창시키는 역브레이튼 사이클 냉동기 (Reverse-Brayton cycle refrigerator) 나 재생식 열교환기 (regenerative heat exchanger) 를 사용하는 재생식 극저온 냉동기 (regenerative cryocooler) 에 비해 효율이 낮다는 단점이 있다.

그러나 작동 유체로 혼합 냉매를 사용하는 J-T 냉동기는 내부적으로 발생하는 비가역성을 크게 줄일 수 있어, 잘 설계된 혼합 냉매 J-T 냉동기의 경우 앞에서 언급한 다른 종류의 냉동기에 견줄 수 있을 만큼 충분한 효율을 낸다. 따라서 이상 유체 (two-phase fluid) 의 팽창과정에서 발생하는 수력학적 문제 때문에 기계적인 팽창기를 사용할 수 없는 냉동 사이클의 경우 혼합 냉매 J-T 냉동기는 역브레이튼 사이클 냉동기를 대체하여 사용될 수 있다.

이 외에도 간단한 구성으로 매우 낮은 온도를 얻기 위해 다른 냉동기와 다단으로 구성되어 하이브리드 형태로 사용되기도 한다. 이와 같이 J-T 냉동기는 현재에도 다양한 분야에 사용되고 있다. 이에 본고에서는 J-T 냉동의 기본 개념과 J-T 냉동기의 발전 과정과 전망에 대해 살펴보기로 한다.

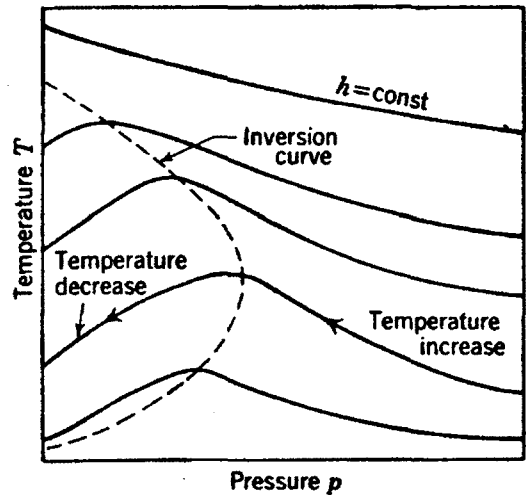
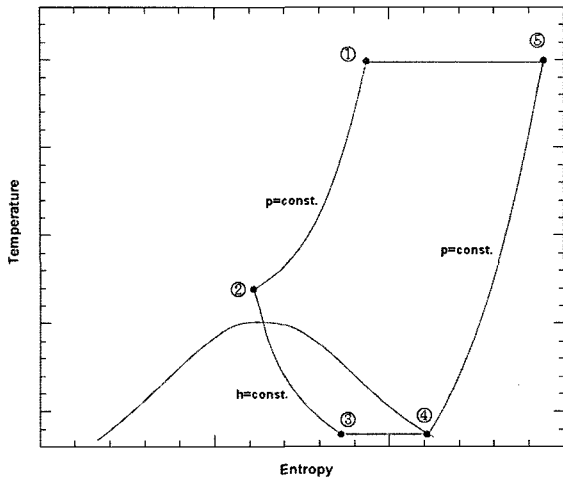


그림 1. Isenthalpic curve[1]

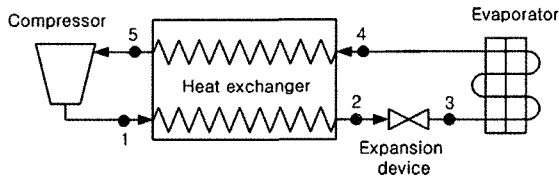
2. J-T 냉동의 기본 원리와 적용

J-T 냉동은 J-T 효과를 이용한 냉동 사이클인 Linde-Hampson 사이클을 기본으로 한다. J-T 효과란 실제 기체가 모세관이나 오리피스 (orifice) 등과 같은 단열된 좁은 통로를 통과하면서 자유 팽창할 때 등엔탈피 곡선 (isenthalpic curve) 을 따라 온도가 변하는 현상을 말한다(그림 1). 헬륨 (He) 이나 수소 (H₂), 네온 (Ne)의 경우를 제외하고 대부분의 기체는 고압, 상온에서 자유 팽창시켰을 경우 온도가 낮아진다. 또한 온도가 낮을수록 J-T 팽창 효과는 커지므로 팽창 전 예냉 (precooling)을 통해 온도를 낮추면 J-T 팽창 효과를 더 크게 할 수 있다.

이러한 J-T 효과를 이용한 냉동 사이클 (Linde-Hampson cycle) 을 T-s 선도에서 나타내면 그림 2(a)와 같이 나타낼 수 있으며 시스템의 개략도는 그림 2(b)와 같다. 그 과정을 살펴보면, 상온 고압의 냉매는 열교환기를 통과하면서 팽창 과정을 거친 저온 저압의 냉매



(a)



(b)

그림 2. (a) T-s diagram of Linde-Hampson cycle, (b) Scheme of J-T refrigeration system

와 열교환을 통해 예냉되고(1→2) 예냉된 냉매는 팽창부를 통과하면서 J-T 효과에 의해 저온 저압 상태가 된다(2→3). 저온 저압 상태의 냉매는 증발부에서 외부와 열교환하여 냉각대상을 냉각시킨 뒤(3→4) 열교환기를 통과하면서 공급 냉매를 예냉하는데 사용된다(4→5). 열교환기를 빠져나온 냉매는 압축기를 통해 다시 압축되어 순환하거나(5→1), 외부로 배출되어 버려진다.

여기서 압축기를 통해 순환하는 시스템을 폐쇄형 사이클 (closed cycle), 고압의 저장소로부터 기체를 제공받고 냉동에 사용된 후 외부로 배출되는 시스템을 개방형 사이클 (open cycle) 이라고 한다. 폐쇄형 사이클은 적당한 양으로 충전한 기체를 계속 순환해서 사용하기 때문에 기체의 소비가 없고 일정한 압력비를 유지할 수 있어 장시간 연속적인 운전이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 기체의 압축과정에서 일어나는 발열이나 작동 유체가 오일에 용해되는 문제 등 고려해야할 점

들이 많아 전체 시스템을 크고 복잡하게 만든다. 한편, 개방형 사이클은 압축기를 사용하지 않기 때문에 급속한 냉각을 위해 고압과 저압의 압력비가 매우 크게 설계한 경우에도 간단하고 작게 구성할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 운전하는 동안 계속해서 고압의 저장소에 있는 기체를 소비하기 때문에 장시간 운전시 일정한 압력비를 유지하기가 어려워 냉동 성능이 점점 감소되는 단점이 있다.

따라서 J-T 냉동기를 적용할 때, 작동 유체를 외부로 배출할 수 없는 경우이거나 고정된 위치에서 장시간 연속적인 운전을 요구하는 대형 냉동 시스템에 적용할 경우에는 폐쇄형 사이클로 구성한다. 반면 짧은 시간 동안의 일회적인 냉각이나 이동하는 장치의 냉각과 같은 경우에는 개방형 사이클로 구성해서 사용한다.

이러한 대표적인 적용 분야는 폐쇄형 사이클의 경우는 대형 액화 장치나 재응축 장치, 활성 기체를 섞어서 작동 유체로 사용하는 혼합 냉매 J-T 냉동기 등이 있고, 개방형 사이클은 미사일이나 군용 장비에 사용되는 소형 적외선 센서의 냉각, 소형 전자 장치의 냉각, 극저온 수술용 프로브, 우주 항공 분야 등이 있다.

3. J-T 냉동기의 발전 과정

J-T 냉동기는 Perkins, J. (1834) 가 처음으로 구상하였고 Twinning, A. (1853) 가 처음으로 원형 (prototype) 을 제작하였다. Garrson, D. (1856) 는 대용량의 산업용 냉동기를 제작하였고 후에, Linde, C.와 Hampson, V. (1895) 는 각각 공기 액화용 J-T 냉동기를 개발 해내었다. 이 후 계속된 연구로 1908년에 Kamerlingh Onnes, H. 는 5단 냉동기를 사용해서 최초로 헬륨을 액화시키는데 성공하였다[2].

J-T 냉동기의 개발 과정에서 혁신적이라 할 수 있는 것은 팽창 기구로 사용되는 유량 조절 장치 (self-regulating device) 의 개발, MEMS 기술을 도입한 효율적인 소형 열교환기의 개발과 혼합 냉매의 도입이다.

유량 조절 장치는 1964년 E. W. Peterson과 M. J. Nagy가 소형 유량 조절 장치를 고안한 이래 다양하게 개발되어 왔다 [3-6]. 유량 조절 장치는 전체 시스템이 정상

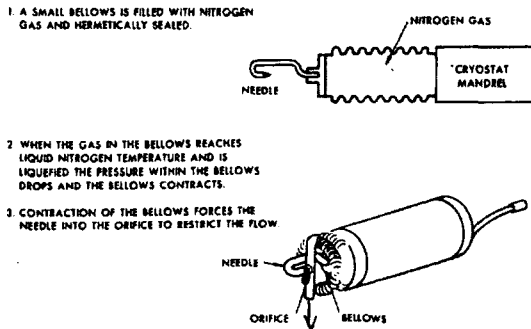


그림 3. Self-regulating expansion device[4]

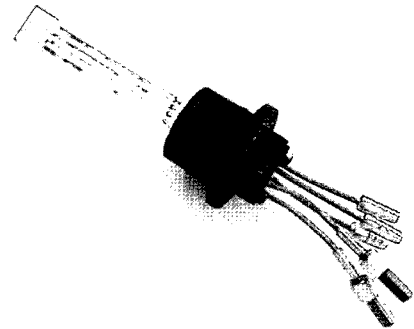
상태로 작동하면서 낮은 온도에 도달했을 때 불필요하게 소모될 수 있는 유량을 줄여주어 개방형 사이클의 경우 장시간의 작동 중에도 일정한 압력비를 유지하면서 안정적으로 작동할 수 있도록 해 준다(그림3). 이와 같은 장치에 대해 S. B. Chien 등은 과도 특성을 해석과 실험을 통해 보였으며[6] 홍용주 등은 유량 조절 장치를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우 유량 측정을 통해 그 성능 특성을 연구하였다[7].

한편 소형 J-T 냉동기는 앞에서 말한 것과 같이 단순한 구조와 빠른 냉각속도를 지니는 특징이 있어 소형 장치의 냉각에 특히 많이 사용되는데 1978년에 Little에 의해 처음으로 MEMS 기술을 사용한 J-T 냉동기가 제안되었으며 Hollman 등은 이를 발전시켜 유리 재질의 마이크로 J-T 냉동기를 제작하여 상품화에 성공하였다(그림4)[8]. 최근에도 보다 효율적인 열교환기를 가지는 소형 J-T 냉동기를 제작하려는 연구가 진행 중에 있다[10-12].

4. 혼합 냉매 J-T 냉동기의 역사적 배경과 현황

순수 냉매를 사용하는 J-T 냉동기는 앞에서 언급한 것처럼 다른 냉동 시스템에 비해 효율이 크게 떨어진다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 순수 냉매 대신 혼합 냉매를 사용하여 J-T 냉동 시스템의 효율을 높이려는 연구가 1930년대부터 시작되었다[13]. Alfeev 등은 냉동기에 질소와 탄화 수소(Hydrocarbon)의 혼합 냉매를 사용하여 J-T 냉동기의 효율을 상당히 높일 수 있음을 보여 주었다[14]. 그 이후 J-T 냉동기의 효율을 더 높이기 위해 다양한 조합의 혼합 냉매를 이용한 연구가 수행되어 왔다



Two Stage Argon / Neon Refrigerator, MMR Technologies, Inc.

그림 4. Micro miniature J-T refrigerator[9]

[15-17]. 혼합 냉매 J-T 냉동의 가장 큰 적용 분야는 LNG (Liquefied Natural Gas) 플랜트로서, 본질적으로 혼합가스인 천연가스의 성분비와 유사한 냉매 성분을 이용한 MRC (Mixed Refrigerant Cascade) 사이클이 산업계에서 많이 사용되고 있다[18]. 특히 Longsworth 등은 혼합 냉매를 사용하여 일단형 (one-stage) 오일 윤활 방식의 압축기로 구동되는 J-T 냉동기를 개발하였다. 오일 윤활 방식의 일단형 압축기를 사용할 수 있게 되면서 J-T 냉동 시스템은 가격 경쟁력과 신뢰성을 갖추게 되어 상용화가 가능해졌다. 이 냉동기는 80~93 K에서 1~10 W의 냉동 부하를 나타내었다[19]. Luo 등은 네온과 탄화수소 계열의 혼합 냉매를 사용하여 저압부 0.1 MPa, 고압부 2.5~4.5 MPa 조건에서 최저 온도 69~70 K, 액체 질소 온도에서 25~35 W의 냉동 부하를 가지는 냉동기를 제작하였다. 이 실험에서 시스템의 엑서지 효율 (exergy efficiency) 은 5~9 %에 이르렀다[20]. Arkhipov 등은 질소와 탄화수소를 주성분으로 하는 혼합 냉매에 네온을 첨가하여 최저 온도 65 K를 구현하였다[21]. 최근에 Boiarski 등은 탄화 수소 계열의 혼합 냉매가 아닌 폭발성이 없는 Fluorocarbon 계열과 Hydro-fluorocarbon 계열의 혼합 냉매를 이용한 J-T 냉동기에 대한 연구를 수행하였다[22].

최대의 성능을 내는 J-T 냉동기의 혼합 냉매의 최적 성분비에 대한 연구도 진행되어 Gong 등은 최대의 엑서지 효율을 가지는 최적 성분비를 계산하는 알고리즘[23]을, Keppler 등은 최대의 냉동 용량 또는 작은 열교환기를

가지기 위한 최적 성분비를 계산하는 알고리즘(24)을 보여 혼합 냉매 J-T 냉동기의 설계와 해석을 편이하게 하였다.

5. J-T 냉동기의 전망

앞에서 살펴본 것과 같이 J-T 냉동기는 다른 극저온 냉동기에 비해 간단한 구조를 하고 있고 진동과 마찰을 일으키는 부분이 없어 안정성과 신뢰성 측면에서 뛰어난 냉동기이다. 특히 소형화 측면에서 J-T 냉동기의 장점은 더욱 부각된다. 순수 냉매를 사용했을 때는 다른 냉동기에 비해 효율이 낮다는 단점이 있지만, 앞에서 언급한 혼합 냉매 J-T 냉동기의 경우는 다른 냉동기에 버금가는 효율을 보인다.

이러한 장점 때문에 혼합 냉매 J-T 냉동기는 기존의 J-T 냉동기가 사용되는 미사일이나 우주선에 탑재된 저온 센서의 냉각, 저온 수술 등과 같은 분야 외에도 다른 냉동기가 적용되는 분야를 대체할 수 있을 것으로 생각된다. 아직까지는 작게 제작했을 때 발생하는 열교환기 미세 채널에서의 이상 유동 현상이 명확히 밝혀져 있지 않아 소형 혼합 냉매 J-T 냉동기의 설계가 이루어지지 않고 있지만 향후 이에 대한 연구로 상용화된 소형 혼합 냉매 J-T 냉동기가 여러 분야에 쓰일 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] R. F. Barron, "Cryogenic system", Oxford university press, New york, 1985.
 [2] M. J. Boiarski, V. M. Brodianski, and R. C. Longsworth, "Retrospective of mixed-refrigerant technology and modern status of cryocoolers based on one-stage, oil-lubricated compressors", Adv. Cryo. Eng., vol. 43, pp. 1701-1708, 1998.
 [3] E. W. Peterson and M. J. Nagy, US Patent 3,269,140,
 [4] J. S. Buller, "A miniature self-regulating rapid-cooling Joule-Thomson cryostat", Adv. Cryo. Eng., vol. 16, pp. 205-123, 1971.

[5] M. J. Boiarski, et al., US Patent 5,595,065, 1997.
 [6] S. B. Chen, L. T. Chen and F. C. Chou, "A study on the transient characteristics of a self-regulating Joule-Thomson cryocooler", Cryogenics, vol. 36, pp. 979-984, 1996.
 [7] Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Young-Don Choi, "The behavior of mass flow rate of a Joule-Thomson refrigerator", Adv. Cryo. Eng., vol. 51, pp. 565-572, 2006.
 [8] 홍용주, 박성제, 고득용, 최영돈, "열전도도가 마이크로 줄톰슨 냉동기의 성능에 미치는 영향에 대한 열역학적 해석", 한국초전도저온공학회논문지, 7권 2호, 2005.
 [9] <http://www.mmr.com/neref.html>
 [10] P.P.P.M. Lerou, T.T. Veenstra, J.F. Burger, H.J.M. ter Brake, H. Rogalla, "Optimization of counterflow heat exchanger geometry through minimization of entropy generation", Cryogenics, Vol. 45, pp. 659-669, 2005.
 [11] Weibin Zhu, Yogesh B. Gianchandani, Gregory F. Nellis, Sanford A. Klein, "Micromachined heat exchanger for a cryosurgical probe", The 11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC 2005), pp. 112-116, 2005.
 [12] P.P.P.M. Lerou, G.C.F. Venhorst, C.F. Berends, T.T. Veenstra, M. Blom, J.F. Burger, H.J.M. ter Brake, H. Rogalla, "Fabrication of a micro cryogenic cold stage using MEMS-technology", J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, pp. 1919-1925, 2006.
 [13] W. J. Podbielniak, "Art of refrigeration", U. S. Patent 2,041,725, 1936.
 [14] V. Alfeev, V. Brodyansky, V. Yahodin, V. Nikolsky and A. Ivantsov, U. K. Patent 1,336,892, November, 1973.

[15] A. P. Kleemenko, "One flow cascade cycle (in schemes of natural gas liquefaction and separation)", International Institute of Refrigeration, paper 1-a-6, 1959.

[16] E. C. Luo, M. Q. Gong, Y. Zhou, J. T. Liang, "Experimental comparison of mixed refrigerant Joule-Thomson cryocoolers with two types of counterflow heat exchangers", Cryocoolers 10, pp. 481-486, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.

[17] E. D. Marquardt, R. Radebaugh, and J. Dobak, "A cryogenic catheter for treating heart arrhythmia", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 43, pp. 903-910, Plenum Press, New York, 1998.

[18] R. R. Bowen, E. T. Cole, E. L. Kimble, E. R. Thomas, L. R. Kelley, "Multi-component refrigeration process for liquefaction of natural gas", U. S. Patent 5,950,453, 1999.

[19] R. C. Longsworth, M. J. Boiarski and L. A. Klusmier, "80 K closed-cycle throttle refrigerator", Cryocoolers 8, pp. 537-541, Plenum press, New York, 1995.

[20] E. C. Luo, J. Liang, Y. Zhou, V. V. Yakuba and M. P. Lobko, "Experimental investigation of an efficient closed-cycle mixed-refrigerant J-T cooler", Cryocoolers 9, pp. 529-535, Plenum press, New York, 1997.

[21] V. T. Arkhipov, V. V. Yakuba, M. P. Lobko, O. V. Yevdokimova and H. Stears, "Multicomponent gas mixture for J-T cryocooler", Cryocoolers 10, pp. 487-495, Plenum press, New York, 1999.

[22] Mikhail Boiarski, Oleg Podtcherniaev, Kevin Flunn, "Comparative performance of throttle cycle Cryotiger coolers operating with different mixed refrigerants", Cryocoolers 13, pp. 481-488, Springer

Science+Business Media, Inc., New York, 2004.

[23] M. Q. Gong, E. C. Luo, Y. Zhou, J. T. Liang, and L. Zhang. "Optimum composition calculation for multicomponent cryogenic mixture used in Joule-Thomson refrigerators", Advances in Cryogenic Engineering, vol. 45, pp. 283-290, 2000.

[24] F. Keppler, G. Nellis, S. Klein, "Optimization of the composition of a gas mixture in a Joule-Thomson cycle", HVAC&R Res 10(2), pp. 213-230, 2004.

저자이력

황규완(黃圭完)

1979년 10월 3일생, 2005년 한양대 공대 기계공학부 졸업, 현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정



인세환(印世煥)

1978년 2월 24일생, 2000년 연세대 기계전자공학부 졸업, 2002년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년 ~ 1995년 MIT - Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 정교수

