

## 혼합 냉매를 이용한 극저온 J-T 냉동기에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study of The J-T Cryocooler with Mixed Refrigerant

이경수\*, 정상권\*\*

K. S. Lee\*, S. G. Jeong\*\*

**Abstract** : An experimental study on the Joule-Thomson cryocooler with the mixed refrigerant(MR) is described in this paper. J-T refrigeration experiment was performed with a single stage regular air-conditioning compressor. The mixed refrigerant in the experiment was composed of 15% mol fraction of N<sub>2</sub>, 30% mol fraction of CH<sub>4</sub>, 30% mol fraction of C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 10% mol fraction of C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> and 15% mol fraction of iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. Oil mist in the MR stream could be eliminated completely by the glass microfiber filter. Since a single stage compressor that had been designed for R22 is not appropriate for high pressure ratio of the mixed refrigerant especially during the transient period, two modifications were incorporated to regular J-T refrigeration cycle. First, a portion of the MR was by-passed at the inlet of the heat exchanger and transferred directly to the suction of the compressor in the modified system. Second, a buffer volume was prepared to change the mass flow rate of refrigerant. The pressure ratio in J-T expansion device was relieved at the beginning of the operation due to the by-pass scheme, but it gradually decreased during the transient process as some of the MR component condensed at low temperature. The buffer volume at the suction side was used to increase the MR gas density in the system after the transient cool-down period. From the experiment with the modified system, the refrigerator could reach the lowest temperature of -152°C without cooling load, and about -150°C with 5 W of cooling load.

**Key Words** : J-T cryocooler, refrigeration, mixed refrigerant, compressor, pressure ratio

#### 1. 서 론

혼합 냉매를 이용한 밀폐형(closed type) J-T 냉

동기는 장치 구성 및 운전이 간단하고, 압축기를 제외하고는 움직이는 부분이 없기 때문에 진동이나 소음이 매우 작다. 뿐만 아니라 작동 온도 영역이 넓고 장치의 소형화가 비교적 용이하기 때문에 최근 혼합 냉매를 이용한 냉동기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

혼합 냉매는 구성 성분과 조성비가 많은 경우의 수를 가지므로 여러 학자들에 의해서 이론적, 실험적인 검증들이 이루어지고 있다. 1973년 Missmer[1]에 의해 혼합 냉매를 사용한 실험이 시작되었으며, 최근에는 APD의 Longsworth 등[2]이 혼합 냉매를 이용해 80 K용 밀폐형 J-T 냉동기를 개발하였다. 장치의 내구성이 우수한 이 장치는 오일 윤활 방식의 단상 압축기를 이용한 것이며 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 Khatri 등[3]은 1997년에 70 K - 120 K 사이에서 작동하는 여러 종류의 혼합 냉매에 대한 상태량 계산 및 J-T 냉동기 실험을 수행한 바 있다. 이러한 온도 영역의 저온 냉동기는 각종 감시 장비 및 전자 장비의 냉각, 그리고 진공 장치의 수분 제거 장치(water trapping device) 및 의학 분야 등에 폭넓게 응용되고 있다.

1997년 Longsworth 등[4]은 혼합 냉매와 산소, 그리고 흡착식 압축기를 이용한 다단 냉각 방식을 이용해 65 K의 극저온을 위한 연구를 수행하였다. 그리고 중국의 Luo 등[5][6]은 질소와 탄화수소계열의 약 4~5 종류의 성분을 이용해 저압을 0.1 MPa로 고정하고, 고압부를 2.5 MPa에서 4.5 MPa까지 변

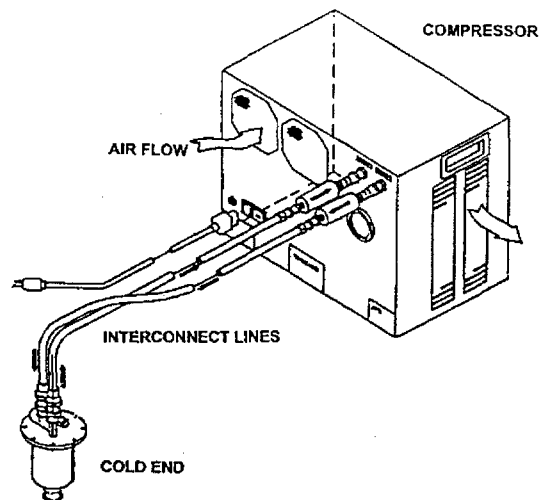


그림 1. CRYOTIGER 장치 : 압축기, 내부연결부, 저온부등[2]

Fig. 1. CRYOTIGER system : Compressor, Interconnect lines, Cold end[2]

\* 학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 석사과정

\*\* 정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 부교수

원고접수 : 2001년 04월 25일

심사완료 : 2001년 04월 28일

화시키는 J-T 냉동기 실험을 수행한 바 있으며, 그 후로 R12/R22용 가정용 공조 장치에 이용되는 압축기를 이용해 80 K에서 약 30 W의 냉동 부하를 확인하였다.

또한 2000년 Lee 등[7]은 일반 공조용 압축기를 이용한 액체 질소용 J-T 냉동기 실험의 전 단계로서 NIST 혼합 가스 자료[8]를 이용하여 주어진 실험 조건에 적합한 구성 성분과 조성비를 결정하는 방법론을 제시한 바 있다.

압축기는 단상의 일반 에어컨용 스크롤 압축기(scroll compressor)를 이용하였다. 또한 증발기에서 극저온의 온도가 형성되는 저온 냉동기에서는 열교환기와 증발기 내에서 오일 액적(oil mists)을 제거하는 것이 대단히 중요하다. 따라서 오일 분리기와 오일 필터를 설치하였다. 오일 필터는 오일 액적의 입경 분포 (particle size)를 고려하여 기공 크기(port size)가 0.7  $\mu\text{m}$ 와 1.2  $\mu\text{m}$ 의 두 종류를 직렬로 배치하여 오일 액적을 여러 단계에서 여과하도록 하였다.

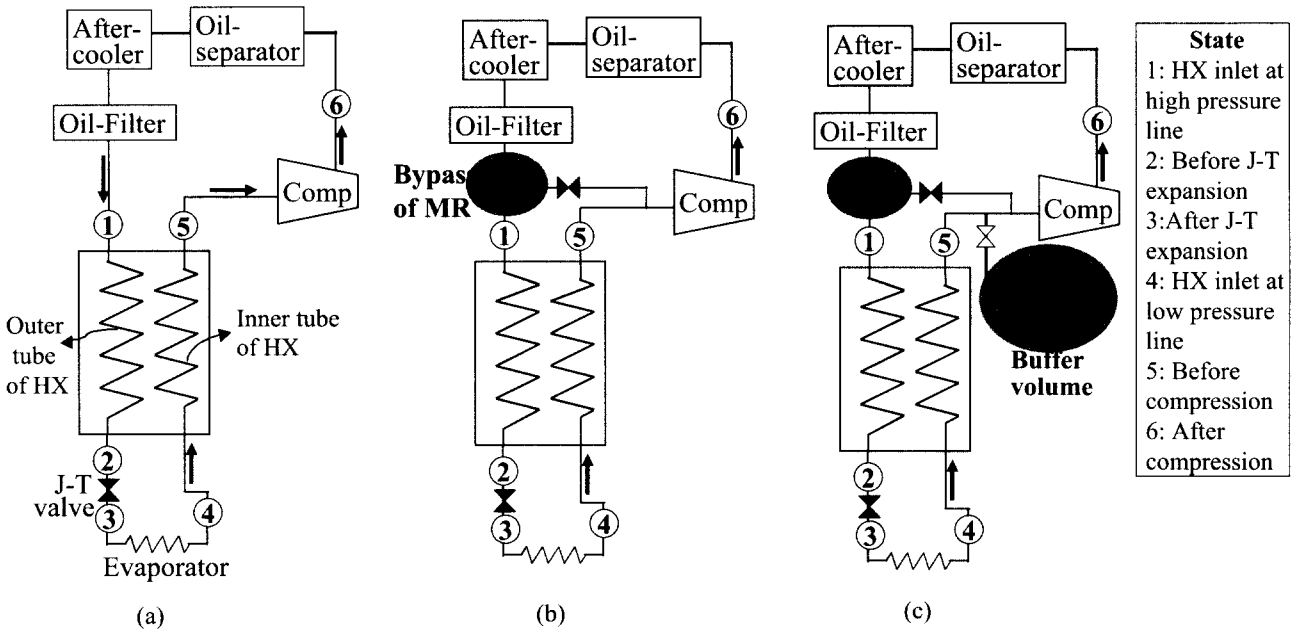


그림 2. 밀폐형 J-T 저온 냉동기의 개략도: (a) 기존 냉동기, (b) 냉매의 일부를 우회(by-pass)시킨 냉동기, (c) 우회 및 버퍼 체적(buffer volume)을 가진 냉동기

Fig. 2. Schematic diagram of the closed J-T cryocooler: (a) Traditional refrigerator, (b) Refrigerator with by-pass, (c) Refrigerator with by-pass and the buffer volume

따라서 본 논문에서는 Lee[7]의 결과에서 제시된 혼합 냉매와 일반 에어컨용 단상, 정속형 압축기를 이용하여 극저온을 구현하기 위한 J-T 냉동기 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치 (Experimental apparatus)

실험 장치는 Fig. 2 (a)에서 보는 바와 같이 기존의 J-T 냉동기처럼 압축기, 후냉각기(aftercooler), 오일 분리기(oil-separator), 오일 필터, 대향류 열교환기 그리고 증발기(evaporator)로 구성되어 있다.

열교환기는 바깥쪽의 3/8 인치 구리관(copper tube)내에 1/4 인치 구리관을 넣어 동심형으로 제작하였는데, 길이는 약 12 m이다. 그리고 두 개의 동심관이 서로 닿는 것을 방지하기 위하여 안쪽 구리관(1/4 인치)표면에 스페이스(spacer)를 감았다. 충분한 열교환을 위하여 최적의 열교환기 길이를 계산하는 것이 보다 더 정확한 실험을 수행할 수 있겠지만, 실제 열교환기 내에서의 열전달 현상은 5 종의 혼합물에 대해서 2 상(two phase) 유동 구간이 존재하기 때문에 계산을 하는 것이 쉽지 않다. 이런 이유로 인하여 열교환기에서는 충분한 열교환을 가정하였다.

### 2.2 혼합 냉매

본 연구에서 사용된 혼합 냉매의 몰분율(mol fraction)은 이소 부탄(iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 15%, 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 10%, 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 30%, 메탄(CH<sub>4</sub>) 30% 그리고 질소(N<sub>2</sub>) 15%로 구성되어 있다. 이는 일반 공조용 압축기를 이용하여 액체 질소 온도용 J-T 냉동기를 구성하기 위하여 혼합 냉매를 선정하는 방법론을 제시했던 Lee[7]의 연구를 바탕으로 한 것이다.

### 2.3 실험 방법

Fig. 2 (a)에서와 같이 전체 시스템은 밀폐되어 있으며 저압은 3기압, 고압은 20기압 전후의 압력비를 유지하도록 하였다. 또한 J-T 팽창 밸브를 포함한 증발기와 열교환기는 극저온의 온도가 형성되므로 진공 단열하여 실험을 수행하였다.

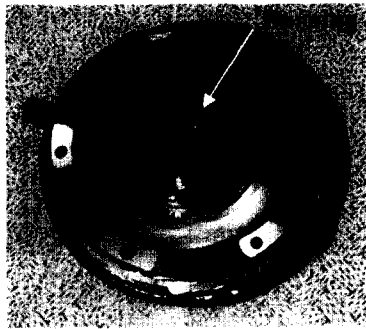
## 3. 실험 및 결과

### 3.1 일반 냉동기에서의 실험 및 결과

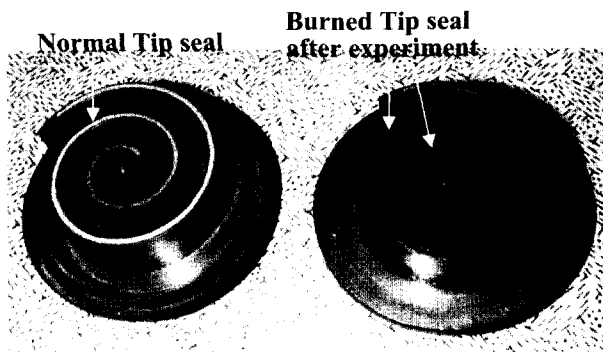
Fig. 2 (a)의 실험장치를 이용하여 실험을 수행한 결과, 압축비와 토출 가스 온도가 과도하게 상승하여 압축기에 치명적인 손상이 발생하였다. 이것은 R22용

으로 설계된 에어컨용 압축기에 탄화수소와 질소의 혼합물을 사용함으로써 압축기 모터에 과도한 부하가 인가된 것으로 판단된다. 또한 압축기 내부 온도가 과도하게 상승하여 스크롤 압축기 내부의 팁 실(tip seal)이 연소(burning)되었다. Fig. 3은 압축기 내부의 고정, 회전 스크롤과 실험 후 탄화된 팁 실을 포함하는 압축기 내부의 사진을 나타낸 것이다.

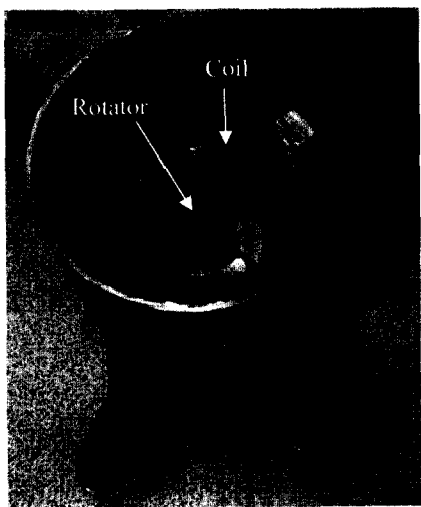
**3.2 우회(by-pass) 구조를 갖는 냉동기에서의 실험 및 결과**



(a) Fixed scroll



(b) Orbiting scroll



(c) Motor system in the compressor

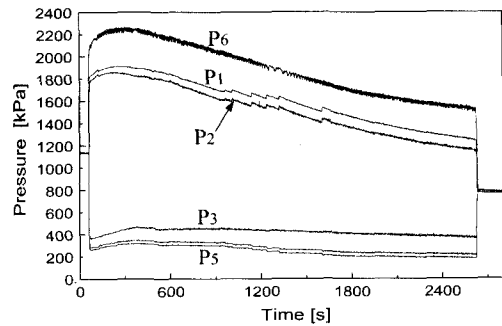
그림 3. 압축기 구조: 고정 스크롤, 회전 스크롤, 팁 실, 회전자 및 코일

Fig. 3. The structure of compressor: Fixed scroll, Orbiting scroll, Tip seal, Rotator and Coil

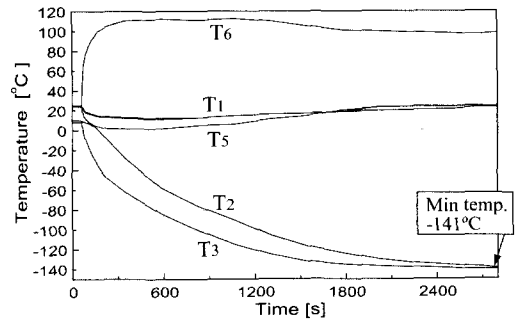
Fig. 2 (a)와 같은 기존의 J-T 냉동기 구조에 혼합

냉매를 사용하여 실험을 수행하게 되면 압축기에 치명적인 손상이 발생하였다. 따라서 압축비와 토출 가스 온도를 낮추기 위하여 Fig. 2 (b)와 같이 열교환기 입구에서 냉매의 일부를 우회(by-pass)시켜 압축기의 흡입(suction)쪽으로 연결하였다. 이렇게 함으로써 두 가지 효과를 기대해 볼 수 있다.

먼저 일정한 양의 냉매를 시스템에 충전하였을 때 압축기 입구(suction)로 유입되는 냉매의 압력은 냉매의 밀도(density)에 비례하게 된다. 증발기 출구와 압축기 입구 사이에서 냉매 밀도를 높게 되면 상대적으로 토출 되는 냉매의 밀도는 낮아지고, 이로 인하



(a) Pressure vs. time



(b) Temperature vs. time

그림 4. 혼합 냉매의 일부를 우회(by-pass)시켰을 때의 실험 결과: (a)압력-시간 선도, (b)온도-시간 선도

Fig. 4. Experimental results with the by-pass of a portion of mixed refrigerant: (a) Pressure - Time diagram, (b)Temperature - Time diagram

여 압축기 출구에서의 압력 하락을 기대해 볼 수 있다. 즉 고압부가 21 기압, 저압부가 2 기압이었던 상태에서 저압부의 압력을 3 기압으로 만들 수 있다면 고압부는 20 기압 이하로 낮아져 처음의 경우보다 압축비가 줄어드는 것이다.

두 번째는 열교환기 입구 쪽에서 우회(by-pass)되는 냉매를 적절히 팽창시켜 압축기 입구로 연결하게 되면 압축기로 흡입되는 냉매의 온도를 낮추게 되고, 이로 인하여 결과적으로 압축기 토출 가스의 온도를 낮출 수 있다는 것이다.

수정된 장치를 이용하여 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (b)의 온도-시간 선도를 보게 되면 약 45분의 운전동안 증발기에서 -141°C의 무부하 온도를 얻을 수 있었으며, 우회(by-pass)시키는 구조는 이전 장치에 비해 압축기의 안정된 작동을 가능하게 하였다. 하지만 Fig. 4의 압력-시간 선

도와 온도-시간 선도를 보게 되면, 실험이 시작된 직후는 토출 온도가 크게 상승하여 시스템 내부의 압력이 전반적으로 상승하였다. 하지만 실험이 진행될수록 열교환기 및 증발기에서 계속적으로 온도가 하락하여 혼합 냉매가 액화되었다. 이로 인하여 시스템 전체의 압력과 J-T 팽창 전후의 압력비가 실험의 초반부에 비해 감소하였고 더불어 온도 하락률(temperature

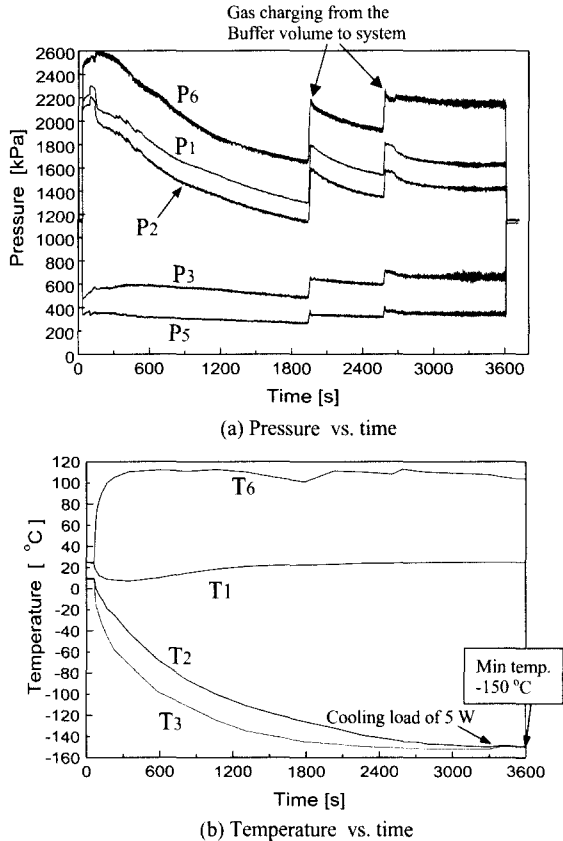


그림 5. 냉매의 일부를 우회(by-pass)시키고, 버퍼 체적(buffer volume)을 사용했을 때의 실험 결과: (a)압력-시간 선도, (b)온도-시간 선도  
 Fig. 5. Experimental results with the by-pass and buffer volume: (a)Pressure-Time diagram, (b)Temperature-Time diagram

decrease rate)이 감소함을 알 수 있었다.

### 3.3 우회(by-pass) 구조와 버퍼 체적(buffer volume)을 갖는 냉동기에서의 실험 및 결과

앞 절의 냉매의 일부를 우회시킨 실험을 통하여 실험이 진행될수록 온도가 하락하고 냉매가 액화되어 시스템의 전반적인 압력이 감소한다는 것을 보았다. 이로 인하여 발생하는 J-T 팽창 압력비의 감소를 막기 위하여 Fig. 2 (c)와 같이 압축기 흡입부(suction)에 버퍼 체적(buffer volume)을 설치하였다. 버퍼 체적은 약 4.5 Liter로 시스템 전체의 체적과 비슷하며, 팽창 압력비가 낮아졌을 때 밸브를 열어 전체 시스템의 가스 밀도를 증가시켜 실험의 초기와 비슷한 환경을 만드는 역할을 하였다.

냉매의 일부를 우회시키면서 버퍼 체적을 사용한 실험은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 진공 단열한 상태에서 약 1 시간 정도 수행되었으며 -150°C에서 냉동부하가 5 W였다. 냉동부하를 인가하지 않은 경우 최저

온도는 -152°C였으며 5 W의 냉동부하로 인한 온도 상승은 약 2°C였다. 또한 버퍼 체적을 사용함으로써, 우회 구조만을 갖는 앞 절의 실험과 비교해 볼 때 무부하 온도가 약 10°C정도 더 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 6은 실험을 수행하면서 압축기에서의 전력 소모량을 측정하는 것이다. 실험 시작 직후와 버퍼 체적으로부터 시스템으로 냉매를 공급할 때와 같이 압축기에서

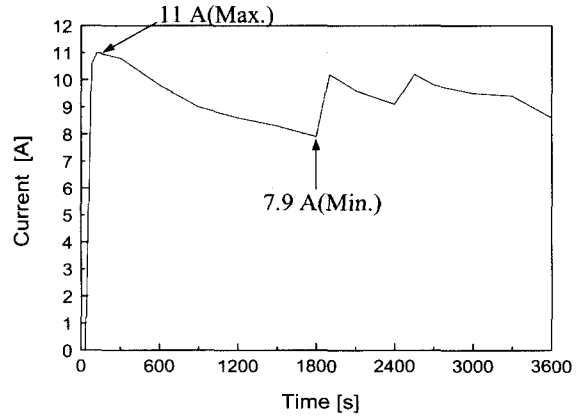


그림 6. 압축기의 전류 소모량  
 Fig. 6. Apparent current consumption in the compressor

의 압축비가 커질수록 전류 소모량이 크다는 것을 알 수 있다. 최대 전류 소모량은 실험이 시작된 직후이며 11 A였다.

## 4. 결 론

프레온 계열의 단일 냉매를 위하여 설계된 일반 공조용 압축기와 혼합 냉매를 사용한 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, Fig. 2 (a)와 같이 기존의 J-T 냉동 방식은 압축비와 토출 가스 온도 그리고 압축기에서의 전력 소모량이 과도하게 상승하여 압축기가 손상되었다. 특히 냉동기가 작동된 직후 수 분 동안 압축된 토출 가스로 인하여 전체 시스템의 압력이 상승하였고, 이때 압축비와 토출 가스 온도의 상승은 더욱 더 치명적이었다.

둘째, 혼합 냉매를 사용한 본 연구에서는 냉매를 우회(by-pass)시킴으로써 냉동기 작동 초반에 압축비와 토출가스 온도의 비약적인 상승을 막을 수 있었다. 그리고 실험이 진행되면서 냉매의 팽창 압력비를 높이기 위한 버퍼 체적이 온도 하락에 작은 영향을 미쳤다. 따라서 질소와 이소 부탄, 프로판, 에탄, 그리고 메탄을 혼합한 냉매와 에어컨용 단상, 정속형 압축기를 사용한 J-T 냉동기 실험에서는 우회(by-pass) 구조와 버퍼 체적(buffer volume)을 갖는 Fig. 2 (c)의 장치가 최적이었다. 이때의 실험 결과는 -150°C에서 냉동부하가 5 W였고 무부하 온도는 -152°C였으며 5 W의 냉동부하로 인한 온도 상승은 약 2°C였다.

## 후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술 연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Missmer D. J., "Self-Balancing, Low Temperature Refrigeration System", U. S. Patent 3.768.273, 1973.
- [2] Longworth R. C., Boiarski H. J., and Klusmier L. A., "80 K Closed-Cycle Throttle Refrigerator, Cryocoolers", Vol. 8, pp. 537-541, 1995.
- [3] Khatri A. and Boiarski M., "A Throttle Cycle Cryocooler Operating with Mixed Gas Refrigerant in 70 K to 120 K Temperature Range", Cryocoolers, Vol. 9, pp. 515-520, 1997.
- [4] Longworth R. C. and Hill D., "65 K Two-Stage MR/O<sub>2</sub> Throttle Cycle Refrigerator", Cryocoolers, Vol 9, pp. 537-546, 1997.
- [5] Luo E. C., Liang J. and Zhou Y., "Experimental Investigation of an Efficient Closed-Cycle Mixed Refrigerant J-T Cooler", Cryocoolers, Vol. 9, pp. 529-535, 1997.
- [6] Luo E. C., Zhou Y. and Gong M. Q., "Mixed Refrigerant Joule-Thomson Cryocooler Driven By R22/R12 Compressor", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 43, pp. 1675-1679, 1998.
- [7] Lee K., Jang K. T. and Jeong S., "A Study on the Determination of Mixed Refrigerant for the Joule-Thomson Cryocooler", J of Air-conditioning and Refrigerating of Engineers of Korea, Vol. 12, No. 10, pp. 901-907, 2000.
- [8] NIST Database 14: "NIST Mixture Property Program", 1992.

### 저 자 소 개



#### 정상권(丁常權)

1962년 8월 16일 생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공박). 1992년~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원. 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수



#### 이경수(李景洙)

1973년 9월 2일 생, 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업, 현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정