

액화질소 초저온과 이원냉동 초저온 냉열의 비교 실험적 연구 A Study on the Cold Energy for Liquefied Nitrogen Gas and Cascade Refrigeration System

김철수 · 장현순 · 정효민 · 정한식

C. S. Kim, H. S. Jang, H. M. Jeong, H. S. Chung

Key Words : Vaporizer(기화기), Increasing temperature characteristics(승온특성), Liquefied nitrogen(액화질소), Super low temperature(초저온), Binary refrigeration(이원냉동)

Abstract : This paper represents the cold energy for liquefied nitrogen gas and cascade refrigerator. In this study, the vaporizer of liquefied nitrogen gas has the fin coil tube type with the dimension of inside diameter of 10mm and outside diameter of 12mm. Also, the total length of vaporizer is 20,000mm. The main experimental parameters are the mean velocity in duct and the supplied flow rates of liquefied nitrogen gas. For the cascade refrigeration system, the refrigerants are ethane(R 170) in the high pressure stage and R 22 in the low pressure stage.

기호설명

- A : 유입공기 측 덕트의 단면적[m^2]
- g : 중력가속도[$kg \cdot m/s^2$]
- P_T : 전압[Pa]
- P_S : 정압[Pa]
- \dot{m}_{air} : 공기의 질량유량[kg/s]
- \dot{m}_{LN_2} : 액화질소의 공급유량[kg/min]
- t : 액화질소의 실험시간
- T : 온도[$^{\circ}C$]
- V : 공기의 유속[m/s]
- W : 액화질소의 무게변화량[kg]
- ρ : 공기의 밀도[kg/m^3]

1. 서 론

초저온에 관한 연구는 냉열활용 뿐만 아니라 반도체, 우주항공, 의학치료, 냉동보관, 초전도 등에서 대단히 중요한 요소이다. 초저온 냉열 물질을 이용한 초저온 액체에 관한 선행 연구 중 S. C. Nam et al.

(2000)^(1,2)은 액체질소를 사용하여 극저온 유체의 증발 2상 유동에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 규명하였고, K. I. Choi와 H. M. Chang은(1999)⁽³⁾ 극저온질소-대기 열교환기의 착상이 냉열시스템에 미치는 영향에 대하여 해석하였으며, E. J. Jang(2001)⁽⁴⁾은 액체질소의 기화특성에 대하여 조사 하였다. 초저온 분야의 연구에서 액체질소가 많이 사용되어지는 이유는 상온에서 안정되어 있으며 색, 냄새 맛도 없는 물질로 화학적으로 비활성이며 연소되지 않아 유독 및 사용상 위험이 적기 때문이다. 공기중의 약 78%가 질소기체로 가격이 저렴하고 $-196^{\circ}C$ 의 비점을 가져 냉각제에 많이 쓰인다. 본 연구에서는 2원 냉동 시스템을 이용한 초저온 냉열과 액화질소 기화기 시스템을 이용한 초저온 냉열의 온도 강하 특성을 연구하여 비교 분석 함으로서 초저온 물질의 자연증발 냉열과 2원 냉동의 기계식 초저온 냉열의 생성에서 나타나는 특성을 파악함으로써 냉열을 효과적으로 산업체에 적용 할 수 있도록 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 액화질소 기화기 실험장치

Fig. 1은 액화질소 기화기 실험장치의 사진을 나타낸다. 그림에서와 같이 덕트와 챔버는 내부의 수분응결현상을 관찰하기위해 투명한 아크릴로 되어

접수일 : 2006년 8월 15일, 채택확정 : 2006년 9월 3일
 김철수(책임저자) : (주)KTENG
 E-mail : kteng@kteng.com, Tel : 031-737-5377
 정한식, 정효민 : 경상대학교 기계항공공학부
 장현순 : 군산대학교 대학원

있다. 덕트 내부에는 기화기와 팬이 설치되어 있고, 외부에는 액화질소 공급탱크와 액화질소 공급유량의 측정을 위해 산업용 디지털 저울 (SI-1)이 액화질소 탱크 아래 위치해 있다.

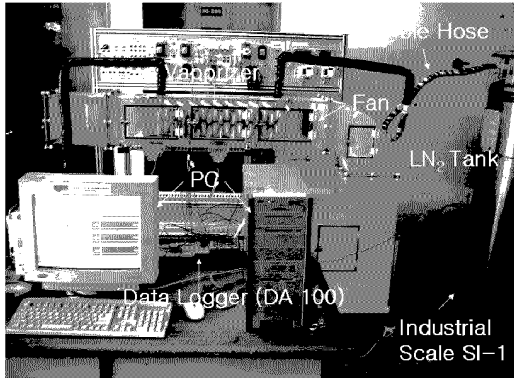


Fig. 1 Experimental apparatus of vaporizer system

2.2 이원냉동 실험장치

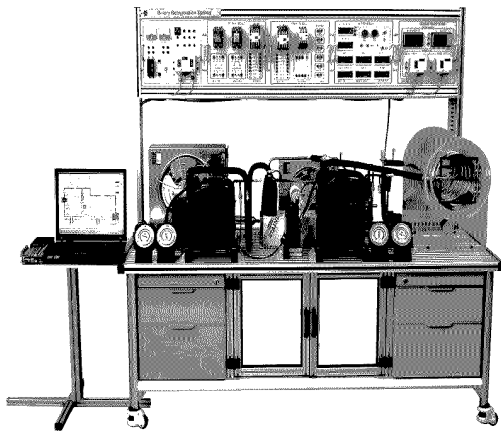


Fig. 1 Binary refrigeration system

Fig. 2는 이원냉동 실험 장치를 나타낸다. 그림에서 캐스케이드 응축기는 1원측에서는 증발기의 역할을 하고 2원측에서는 응축기의 역할을 하는 대단히 중요한 열 교환기이다. 여기서는 판형 열 교환기를 사용하였다.

2.2 액화질소 기화기 시스템의 실험방법

2.2.1 시스템 분류

액화질소 기화기 시스템에서는 두 가지 시스템에 대하여 실험을 수행 하였다.

첫 번째, Fig. 3은 개방형 시스템 개략도로서 실험 동안 외부로부터 새로운 대기의 공기가 계속적으로 유입되고, 이때 액화질소가 흐르는 기화기와 열 교환을 통해 액화질소는 기화되고 챔버 내의 공기를 냉각 시키는 방법이다. 이 시스템은 외부로부터 열량이 많이 공급되므로 액화질소의 빠른 기화에 유용하다. 두 번째, Fig. 4는 밀폐형 시스템으로서 외부의 대기와 시스템 내부가 차단되어 있어 시스템 내부의 공기가 연속적으로 순환되면서 액화질소를 기화시킨다. 이 시스템은 시스템 내부의 매우 낮은 공기의 온도를 요구할 때 필요한 시스템이다. 두 시스템의 실험에서 사용된 변수로서는 시스템 내부의 공기유속과 액화질소의 공급유량을 변수로 두었다.

환을 통해 액화질소는 기화되고 챔버 내의 공기를 냉각 시키는 방법이다. 이 시스템은 외부로부터 열량이 많이 공급되므로 액화질소의 빠른 기화에 유용하다. 두 번째, Fig. 4는 밀폐형 시스템으로서 외부의 대기와 시스템 내부가 차단되어 있어 시스템 내부의 공기가 연속적으로 순환되면서 액화질소를 기화시킨다. 이 시스템은 시스템 내부의 매우 낮은 공기의 온도를 요구할 때 필요한 시스템이다. 두 시스템의 실험에서 사용된 변수로서는 시스템 내부의 공기유속과 액화질소의 공급유량을 변수로 두었다.

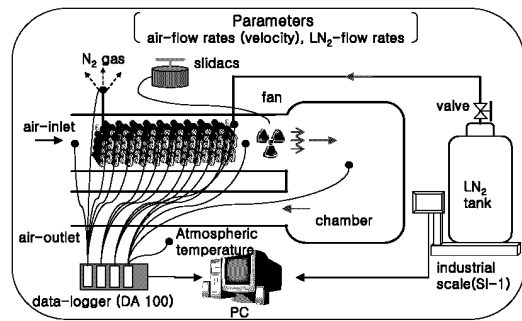


Fig. 3 Schematic diagram of open type system

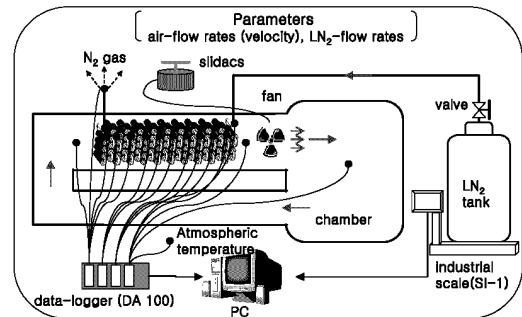


Fig. 4 Schematic diagram of close type system

2.3.2 변수제어 및 온도측정

시스템 각부의 온도측정은 T-type 열전대를 사용하였으며, 측정지점은 기화기 표면과 기화기 전후의 공기, 챔버 내의 공기, 배출 N_2 가스, 대기 등 $T_1 \sim T_{16}$ 까지 총 16개 지점의 온도를 측정하였고, 온도 측정점은 Fig. 3와 4에 점으로 개략적인 측정점을 나타내었다.

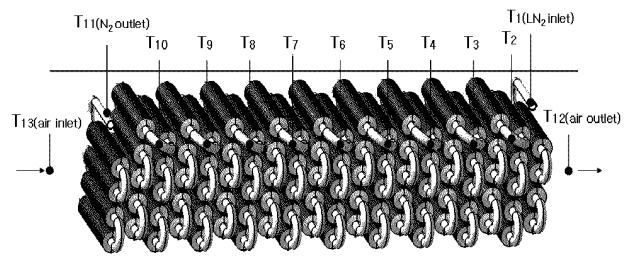


Fig. 5 Temperature measuring point of vaporizer

Fig. 5는 기화기의 모델링으로서 기화기 표면 및 전후 공기의 온도측정지점을 자세하게 나타낸 것이다. 기화기의 튜브의 총길이는 약 20,000mm 이며 액화질소의 유동 방향으로 약 2,000mm씩 등분할한 지점에 열전대를 각 각 설치하였다. 그리고 열전대에서 측정된 온도는 데이터로크(data logger)를 통해 8초에 1개의 데이터를 PC에 기록 및 저장되도록 하였다.

시스템 내부의 공기유속의 제어는 팬(fan)과 전압 조절기(slidacs)가 연결되어 전압을 0V~240V 범위 내에서 조절함으로써 제어하였다. 유속의 측정은 디지털 마노미터를 이용하여 전압(P_T)과 정압(P_S)의 차로써 유속을 계산하였다. 유속을 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$V = \sqrt{2g \frac{(P_T - P_S)}{\rho}} \quad (1)$$

액화질소의 공급유량은 액화질소 탱크에 부착된 수동밸브를 사용하여 제어하였으며, 이때 유량의 측정은 RS-232C가 내장된 산업용 디지털 저울(industrial scale SI-1)을 PC와 연결하여 시간에 따른 액화질소 무게의 변화량을 측정함으로써 질량유량을 구하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{LN_2} = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Fig. 6에서 보는 것과 같이 시간에 따라 액화질소의 무게 변화가 일정한 기울기를 나타내며, 그 감소 기울기가 일정한 것을 볼 수 있다. 따라서 본 실험에서는 시간에 따른 액화질소의 평균 유량을 계산하여 사용하였다.

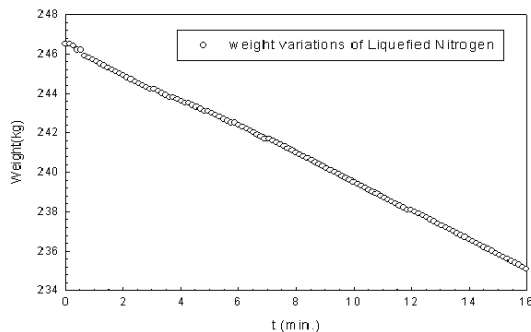


Fig. 6 Weight variations of liquefied nitrogen

2.2.1 실험조건

개방 시스템과 밀폐시스템에 대하여 각 변수마다의 실험조건은 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서와 같이 Test 1~3은 개방 시스템에서 공기의 유속은 일정하고, 액화질소의 유량만을 변수로 한 실험이며, Test 4~6은 밀폐 시스템에서 액화질소 공급유량만을 변수로 한 실험이다. 개방 시스템 Test 7과 밀폐시스템 Test 8은 액화질소의 유량을 거의 동일시 하고 공기의 유속만을 변수로 한 것으로 실험 시작 후 시간에 따라 15분까지는 6.93m/s, 15분~20분까지는 11.99m/s, 그리고 20분~25분까지는 15.99m/s으로 변경하여 실험하였다.

Table 1 Experimental conditions

Contents		V [m/s]	\dot{m}_{LN_2} [kg/min]	humidity [%]	atmospherical temperature [°C]	
open	Test 1	6.93	0.53	58	17.7	
	Test 2		0.71	78	16.0	
	Test 3		1.34	46	17.5	
close	Test 4		0.49	54	17.4	
	Test 5		1.13	84	17.0	
	Test 6		1.42	44	18.0	
open	Test 7	15min	6.93	0.76	48	17.5
		5min	11.99			
		5min	15.99			
close	Test 8	15min	6.93	0.80	50	17.0
		5min	11.99			
		5min	15.99			

2.3 이원 냉동시스템의 실험방법

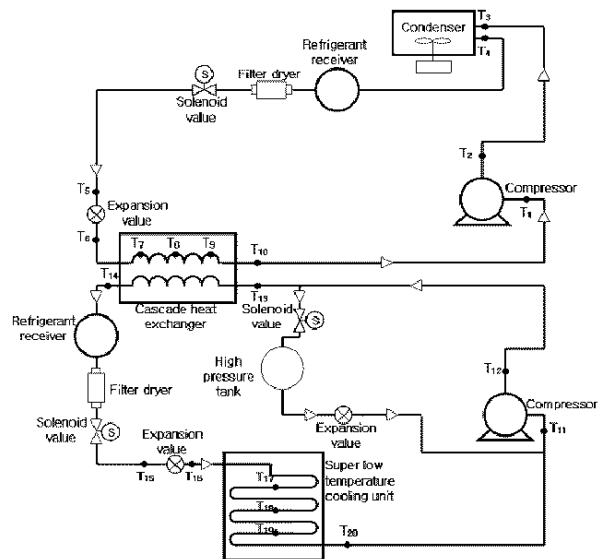


Fig. 7 Temperature acquisition point of the Binary refrigeration system

Fig. 7은 이원냉동 시스템 실험장치의 개략도와

온도 측정위치를 자세하게 나타낸 것이다. 실험방법은 캐스케이드 열 교환기의 온도 변화 실험과 저온측의 증발압력 변화실험으로 2가지 변수를 가지고 실험하였다.

캐스케이드 열 교환기의 온도 변화 실험은 1차측 냉동시스템을 운전하여 캐스케이드 열 교환기의 온도를 -30°C 와 -20°C 각각 두 가지 방법으로 하강하였을 때 2차측을 수동으로 운전을 개시하고 60분을 운전하여 고압측 10개, 저압측 10개의 열전대를 부착하고, 온도를 측정하여 자료를 정리하였다. 저온측 증발압력 변화 실험은 1차 측을 운전하여 캐스케이드 열 교환기의 온도가 -29°C 에서 -31°C 로 유지될 때 2차 측을 수동으로 운전개시 하였으며 증발압력을 정압식 팽창밸브의 개도를 조정하여 0.0bar, -0.3bar , -0.7bar 까지 감소시키면서 각 30분씩 연속으로 운전하여 온도변화를 측정 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액화질소 기화 시스템

3.1.1 유량에 따른 기화기의 온도 분포

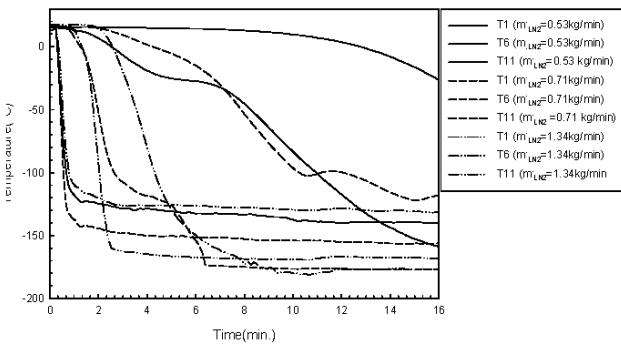


Fig. 8 Temperature distributions of vaporizer surface by \dot{m}_{LN_2} variations in open system

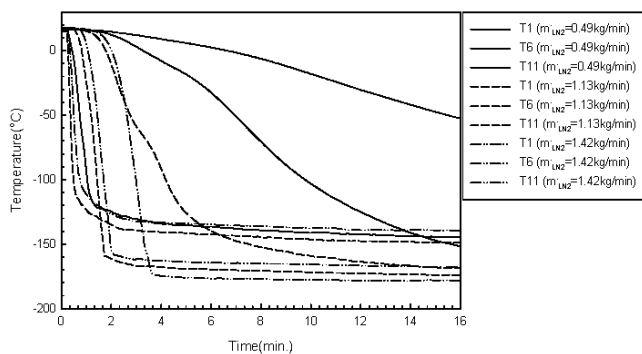


Fig. 9 Temperature distributions of vaporizer surface by \dot{m}_{LN_2} variations in close system

Fig. 8은 개방시스템에서 액화질소의 유량변화에 따른 기화기 입구부분(T_1)과 중간부분(T_6) 그리고 출구부분(T_{11})의 표면온도를 비교한 그래프이다. 액화질소의 공급유량이 증가할 때 기화기 표면에서의 온도는 따라 감소하며 정상상태에 빨리 도달한다. 개방시스템에서 Test 2($\dot{m}_{LN_2}=0.71\text{kg}/\text{min}$)인 경우는 Test 1($\dot{m}_{LN_2}=0.53\text{kg}/\text{min}$)일 때 보다 표면온도가 더 낮아졌지만 Test 3($\dot{m}_{LN_2}=1.34\text{kg}/\text{min}$)일 때는 Test 1과 Test 2보다 더 높아졌다. 또한 Test 3($\dot{m}_{LN_2}=1.34\text{kg}/\text{min}$)일 때 기화기 표면 온도분포를 보면 2분 정도에서는 $T_1(-120.1^{\circ}\text{C}) < T_6(-92.6^{\circ}\text{C}) < T_{11}(-92.6^{\circ}\text{C})$ 이었지만, 정상상태에 도달한 때의 온도분포에서는 $T_1(-131.7^{\circ}\text{C}) > T_6(-168.2^{\circ}\text{C}) > T_{11}(-176.8^{\circ}\text{C})$ 로 온도분포 크기의 역현상이 나타났다. Fig. 9는 밀폐시스템에서 액화질소 유량변화에 따른 기화기 표면의 온도분포 비교한 그래프로서 전체적인 온도분포의 증감분포는 개방시스템에서와 유사하게 타나났다.

3.1.2 공기유속에 따른 온도분포

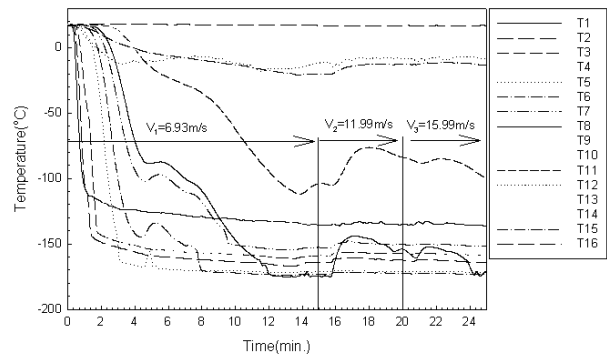


Fig. 10 Temperature distributions by air velocity at $\dot{m}_{LN_2}=0.76\text{kg}/\text{min}$ in open system

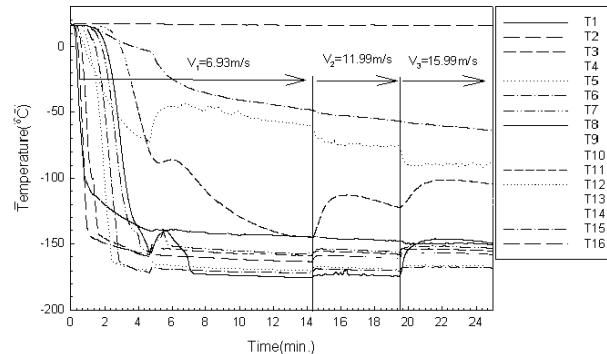


Fig. 11 Temperature distributions by air velocity at $\dot{m}_{LN_2}=0.80\text{kg}/\text{min}$ in close system

Fig. 10은 $m_{LN_2}=0.76kg/min$ 일 때 공기유속에 따른 개방시스템의 온도분포를 나타낸 것이고, Fig. 11은 $m_{LN_2}=0.80kg/min$ 일 때 공기유속에 따른 밀폐 시스템의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 개방 시스템에서의 공기유속 증가는 즉, 열유속의 증가를 의미하므로 기화기 표면의 온도분포를 증가시킨다. 따라서 공기와 맞닿는 기화기 표면에서의 열전달은 촉진하게 된다. 공기의 유속이 증가할 때 기화기 $T_8 \sim T_{11}$ 까지는 영향을 받지만 $T_1 \sim T_7$ 까지는 큰 영향이 없다. 챔버 내의 공기측면에서 보면 개방시스템의 경우 열유속의 증가는 챔버 내의 온도를 크게 저하시키지 못하고 오히려 챔버 내의 온도가 증가하였다. 이것은 냉각된 공기의 냉열을 시스템 내에 저장하지 못하고 바로 덕트 출구로 배출시키기 때문이다. 반면에 밀폐시스템의 경우 열유속의 증가가 챔버 내의 온도변화에 큰 영향을 미치지 때문에 챔버내의 온도 T_{15} 는 최저 $-64^\circ C$ 정도이며, 기화기 후면부의 공기온도 T_{12} 는 최저 $-90^\circ C$ 까지 도달하였다.

3.2 이원냉동 시스템

3.2.1 캐스케이드 열 교환기 $-30^\circ C$ 에서의 1원측의 온도 분포 분석

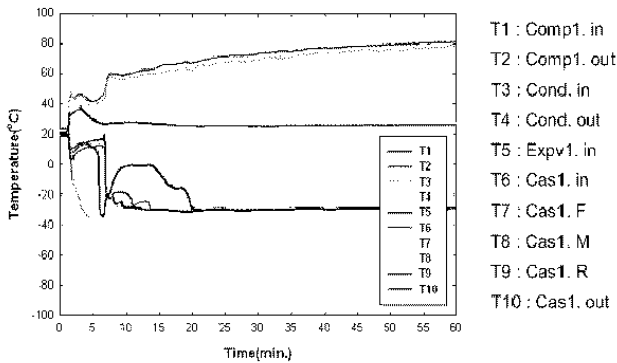


Fig. 12 Temperature values of the Cascade condensing temperature $-30^\circ C$

Fig. 12는 캐스케이드 열 교환기의 온도가 $-30^\circ C$ 일 때 1원측 냉동기의 온도분포도를 나타내고 있다. 압축기 토출과 응축기 입구온도는 $25 \sim 28^\circ C$ 로 정상적인 운전 상태를 유지하고 있으며 저압측은 운전 개시 10분 경과하여 증발온도 강하는 팽창밸브 출구, 캐스케이드 열 교환기 입구, 출구, 그리고 압축기 입구까지 순서대로 온도가 강하하는 것을 알 수

있다. 운전시간이 20분 경과하여서는 저압측의 온도 분포가 거의 동일하여 약간의 습 압축이 진행되지만 시스템에는 큰 지장이 없다.

3.2.2 캐스케이드 열 교환기 $-30^\circ C$ 에서의 2원측의 온도 분포 분석

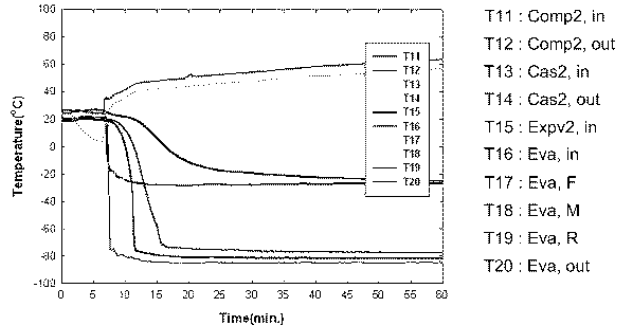


Fig. 13 Temperature values of the Cascade condensing temperature $-30^\circ C$

Fig. 13은 캐스케이드 열 교환기의 온도가 $-30^\circ C$ 일 때 2원측 냉동기의 온도분포도를 나타내고 있다. 2원측 압축기 토출과 캐스케이드 열 교환기 입구 온도는 운전 20분 경과까지는 $45 \sim 50^\circ C$ 를 유지하고 60분을 경과하여 $60 \sim 70^\circ C$ 까지 상승 하였다. 팽창밸브 입구측은 고온측의 증발온도 점이 되므로 운전이 경과하여 15분이 지나서 $-30^\circ C$ 를 유지하였다. 운전시간이 60분이 경과하여서는 증발기 입구에서는 $-90^\circ C$ 를 유지하나 출구에서는 $-75^\circ C$ 까지 상승하는 것으로 보아 저온측의 열 손실이 큼을 알 수 있다. 저압측은 운전 시간이 $5 \sim 17$ 분이 경과하면 증발기 입구에서 출구까지 순서대로 온도가 급강하 하는 것을 알 수 있다.

3.2.3 캐스케이드 열 교환기 $-20^\circ C$ 에서의 1원측의 온도 분포 분석

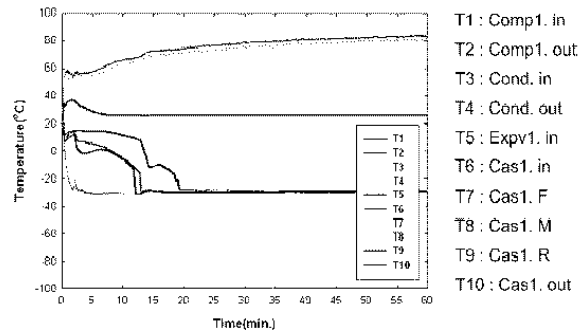


Fig. 14 Temperature values of the Cascade condensing temperature $-20^\circ C$

Fig. 14는 캐스케이드 열 교환기의 온도가 -20°C 일 때 1원측 냉동기의 온도분포도를 나타내고 있다. 1원측의 압축기 토출과 캐스케이드 열 교환기 입구는 $80\sim 85^{\circ}\text{C}$ 로 비교적 안정되게 운전되며 캐스케이드 열 교환기 출구와 팽창밸브 입구 온도는 $25\sim 28^{\circ}\text{C}$ 로 정상적인 운전상태를 유지 하였다. 저압측은 운전개시 13분이 경과하여 팽창밸브 출구, 캐스케이드 입구, 출구, 압축기 입구 순서로 온도가 강하 하였다. 운전시간이 20분이 경과하여 저압측의 온도 분포가 거의 동일한 것으로 보아 약간의 습 압축이 진행되지만 시스템에는 큰 지장이 없다.

3.2.4 캐스케이드 열 교환기 -20°C 에서의 2원측의 온도 분포 분석

Fig. 15는 캐스케이드 열 교환기의 온도가 -20°C 일 때 2원측 냉동기의 온도분포도를 나타내고 있다.

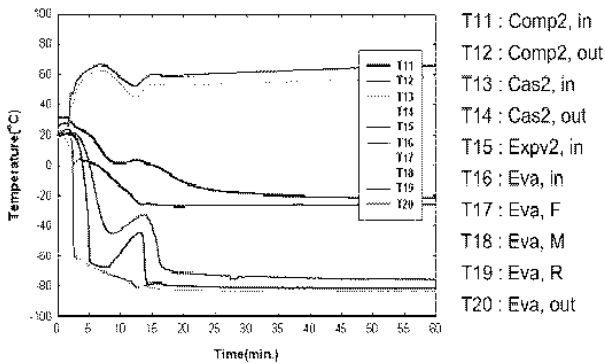


Fig. 15 Temperature values of the Cascade condensing temperature -20°C

2원측의 압축기 토출과 캐스케이드 열 교환기 입구 온도는 60분을 경과하면 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였으며 팽창밸브의 입구 온도는 15분이 지나서 -30°C 를 유지하였다. 저압측은 운전시간이 5-17분이 경과하면 증발기 입구에서 출구까지 순서대로 온도가 급강하 하였다. 운전시간이 60분이 경과하여서는 증발기 입구에서는 -80°C 를 유지하나 증발기 출구에서는 -70°C 까지 상승하는 것으로 보아 과열 압축이 진행되고 있다.

3.2.5 저온 측(이원 측)의 증발압력 변화에 따른 1원 측의 온도 분포분석

Fig. 16 은 저온 측의 증발압력 변화에 따른 1원 측의 온도분포를 나타낸다. 최초 0.0bar 로 운전하면 고압측은 운전시간이 30분이 경과하여 55°C , 60분이

경과하면 60°C 를 유지하고 저압측은 -23°C 를 유지 하였다. 0.0bar 에서 -0.3bar 로 압력을 강하하여 운전 하면 고압측은 60분이 경과하여 50°C , 저압측은 -25°C 를 유지하였다. -0.3bar 에서 -0.7bar 로 압력을 강 하하여 운전하면 고압측은 60분이 경과하여 48°C , 저압측은 -28°C 를 유지 하였다. 실험결과로 보아 2원측의 증발압력을 강하 할수록 1원측의 압축기 일 량이 감소하여 습 압축이 일어났다.

3.2.6 저온 측(이원 측)의 증발압력 변화에 따른 2원 측의 온도 분포분석

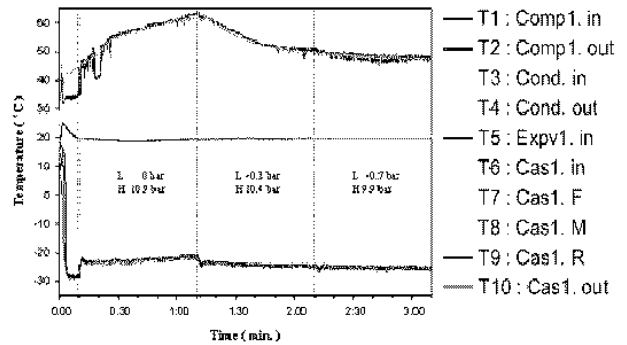


Fig. 16 Temperature values of the vacuum operation

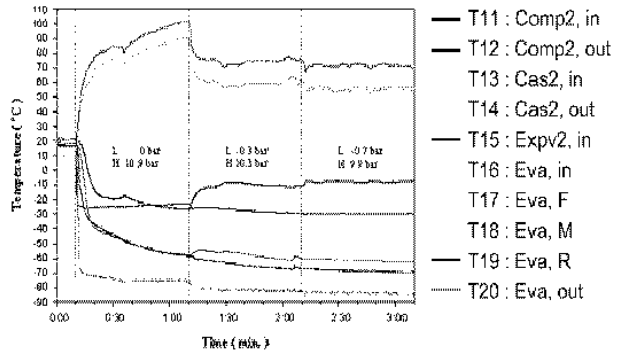


Fig. 17 Temperature values of the vacuum operation

Fig. 17 은 저온 측의 증발압력 변화에 따른 2원 측의 온도분포를 나타낸다. 최초 0.0bar 로 운전하면 2원측의 압축기 토출가스 온도는 60분이 경과하면 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하고 저압측은 -70°C 를 유지 하였다. 0.0bar 에서 -0.3bar 로 압력을 강하하여 운전 하면 고압측은 60분이 경과하여 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$, 저압측은 -80°C 를 유지하였다. -0.3bar 에서 -0.7bar 로 압력을 강하하여 운전하면 고압측은 60분이 경과하여 $55\sim 68^{\circ}\text{C}$, 저압측은 -88°C 를 유지 하였다. 실험결과 로 보아 2원측의 증발압력을 강하 할수록 2원측의 증발부하가 감소하여 압축 일 량의 감소로 증발온 도가 낮아지는 현상을 나타냈다.

4. 결 론

참고 문헌

4.1 액화질소 기화 시스템

(1) 액화질소의 유량이 증가함에 따라 기화기의 표면온도는 보다 빠르게 정상상태에 도달하며 서리의 착상은 개방시스템이 밀폐시스템보다 두껍게 나타났다. 공기의 유속증가는 기화기표면 및 배기질소 가스의 온도를 상승시킴으로 열전달이 촉진됨을 알 수 있었다.

(2) 개방 시스템의 경우는 액화질소를 기화시키는데 유리하고 $m_{LM} = 1.34 kg/min$ 일 때 3.35RT의 냉동 능력을 가진다. 밀폐시스템은 보다 저온의 온도를 요구하는데 유리하며, 본 실험에서는 공기의 유속이 최대 $15.99 m/s$ 일 때 최저 $-90^{\circ}C$ 의 공기온도를 얻을 수 있었다.

(3) 액화질소의 유동방향에 따른 기화기 표면의 온도 증감분포현상이 나타났으며, 이는 액화질소의 증발 시 발생하는 진동과 압축성 유체가 음속을 가질 때 발생하는 관내 압력 및 속도, 외부의 가열조건의 복잡한 관계에 의한 관 내부의 충격과 영향으로 추측된다.

4.2 이원 냉동 시스템

(1) 캐스케이드 열 교환기 온도를 변수로 하여 실험한 결과 1원측은 고, 저압이 안정적으로 운전되어 온도분포가 정상적이었으며 운전시간이 경과함에 따라서 2원측의 증발부하가 감소하여 약간의 습 압축이 일어났다. 한편 2원측은 고압측의 온도 분포는 비교적 안정되나 저압측은 약간의 과열도 발생과 불안정한 운전상태, 약간의 과열도가 발생하였다. 그 원인은 저압측의 단열 부족과 냉매 충전 량의 부족으로 판단된다. 또한 2원측의 증발온도는 $-90^{\circ}C$ 에서 $-80^{\circ}C$ 로 온도가 상승하였으며 원인은 캐스케이드 열 교환기의 온도가 상승하여 2원측의 냉매 응축부하 감소로 인한 압력상승결과 압축기에서 과열도가 증가하였다.

(2) 2원측 저압의 증발압력을 대기압에서 진공압력으로 변수를 주어 실험한 결과 1원측은 2원측의 증발압력이 낮을수록 1원측의 증발온도가 하강 하였으며 캐스케이드 열 교환기의 열 교환량이 감소하기 때문이다. 한편 2원측은 증발압력이 대기압에서 진공압력으로 낮아질수록 $-70^{\circ}C$ 에서 $-88^{\circ}C$ 로 하강하였으며 운전시간 경과에 따라 챔버 부하 감소로 인해 계속 온도가 낮아지는 현상이 나타났다.

1. S. C. Nam et al., 1998, "Characteristics of Evaporation Heat Transfer in a Small-Scale Cryogenic Heat Exchange System for the Utilization of LNG Cold Energy" KIGAS, Vol. 2, No. 4, pp. 25-33.
2. S. C. Nam and Byung Duck Park, 2000, "Performance of Evaporation Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop for Liquid Nitrogen" Trans. of KSME(B), Vol. 24, No. 3, pp. 363-372.
3. K. I. Choi and H. M. Chang, 1999, "Influence of Frost Formation in a Cryogenic Nitrogen-ambient Air Heat Exchanger on Power Generation Cycle Utilizing Cold Energy" Proceeding of the SAREK 1999 Winter Annual Conference, pp. 95-100.