

냉매 저장방식에 의한 쾌속 냉각장치에 대한 실험적 연구

장 기 태[†], 고 준 석, 정 상 권^{*}

한국과학기술원 기계공학과 대학원, ^{*}한국과학기술원 기계공학과

Experimental Study on the Rapid Cooling System by Refrigerant Storage Method

Kitae Jang[†], Junseok Ko, Sangkwon Jeong^{*}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea*

(Received July 23, 2003; revision received September 25, 2003)

ABSTRACT: In the present study, low-temperature low-pressure refrigerant storage method is proposed to achieve higher cooling capacity during a short period of time than that of a compressor in steady operation. Experimental apparatus was designed and set up to analyze the performance of the new-conceptual cooling system. Two reservoirs for sequential storage of refrigerant were used in the cooling system. Several on/off solenoid valves were installed for control of refrigerant flow. From the experimental results, the initial rapid cooling by low temperature low-pressure refrigerant storage method was ascertained for successful operation. This rapid cooling methodology shall be useful for other low-capacity refrigeration system.

Key words: Refrigerant storage method(냉매 저장방식), Initial cooling system(초기 냉각장치), Reservoir(저장소), Adsorbent(흡착제)

기 호 설 명

h : 비엔탈피 [kJ/kg]
 m : 냉매 질량 [kg]
 \dot{m} : 냉매 질량유량 [kg/s]
 q : 전열량 [kW]
 t : 시간 [s]
 V : 체적 [m³]
 W : 동력 [kW]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

1 : 냉매의 압축기 입구상태
 2 : 냉매의 압축기 출구상태
 3 : 냉매의 응축기 출구상태
 4 : 냉매의 증발기 입구상태
 C : 냉수발생이 있는 경우(cooling)
 $Comp$: 압축기
 $Evap$: 증발기
 f : 냉매의 포화 액체상태
 NC : 냉수발생이 없는 경우(no cooling)
 $R1$: Reservoir 1
 $R2$: Reservoir 2

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-869-3079; fax: +82-42-869-3095

E-mail address: kitaejang@webmail.kaist.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 기존의 정수기는 사용자의 기호를

만족시키기 위하여 냉수를 선택할 시에 수돗물을 기계적으로 냉각하여야 하므로 소형 냉동장치가 설치되어 있다. 특히 사용 초기에 시원한 물을 공급받기 위하여, 정수기 내부의 저장용기에는 항상 일정량의 냉수가 저장되어 있다. 그러나 이러한 정제된 물의 저장은 미생물, 박테리아 번식과 약취, 그리고 외부와의 누설로 인하여 여러 가지 문제를 일으켜 왔으므로, 앞으로는 저장 물탱크를 제거하는 방향으로 정수기의 개발이 요구된다. 그러나 물탱크를 제거하는 경우, 사용자가 초기에 시원한 물을 금방 얻을 수 없다면, 냉수음료용 정수기의 상품가치가 크게 떨어질 것이다. 이러한 이유로 인하여 본 논문에서 소개하는 냉동시스템은 기존의 저장 물탱크를 없애면서도, 초기에 사용자가 시원한 물을 일정시간 동안 얻을 수 있도록 작동하게 되어 있다. 기존의 외국 제품을 보면 물 대신에 브라인(2차 냉매)을 일정량 저장하여 그것의 냉열을 이용하고자 한 예가 있는데, 결국 열이 물에서 브라인 그리고 브라인에서 냉매로 이동한다는 사실을 고려한다면, 본 논문에서 묘사하듯이 물과 냉매의 직접 냉각방식이 열전달 측면에서 더욱 효율적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 냉수발생 장치용 냉동기와 유사한 크기를 지닌 소형으로서, 기존의 냉동기보다 훨씬 큰 냉각효과를 초기에 일정시간 동안 얻을 수 있는 냉각장치를 설명하고자 한다.

2. 저온 저압 냉매 저장방식

2.1 개념설계

Fig. 1은 저장소 1(Reservoir 1)에 냉매를 저장

하였다가 필요시 이를 증발기로 토출시켜 순간적인 과대 냉동부하를 감당하도록 하는 냉동시스템의 개념적인 그림이다. 증발기에서 냉동부하가 발생하지 않을 경우에는, 저온-저압의 잉여냉매를 저장소 1에 포화 액체상태로 저장하였다가 사용자가 냉수를 요구하는 순간에, 즉 순간적인 과대 냉동부하가 요구될 때 증발기 내부로 유동하도록 시스템을 구성한다. 이러한 작동원리에 의하여 본 논문에서 제시하는 냉동시스템은 정상상태의 냉동용량보다 훨씬 큰 냉동부하를 일정시간 동안 얻을 수 있게 된다.

2.2 작동원리

2.2.1 냉수발생이 없을 경우

- (1) 압축된 냉매는 팽창밸브에서 팽창한 후 저장소 1에 축적이 되고, 포화 기체상태의 냉매가스는 모두 S1을 통하여 압축기로 유입되며, 냉매저장이 완료되면 압축기는 작동을 멈추게 된다.
- (2) S2는 증발기 내부의 물이 냉수로 유지되도록 간헐적으로 열린다. 이때 증발되는 냉매가 모두 S3을 통하여 압축기로 유입되도록 S4는 항상 닫혀 있다.

2.2.2 냉수발생시

- (1) S2가 열리면서 저장소 1에 저장된 저온의 냉매는 증발기에 유입되며 S1은 닫혀 있다.
- (2) 저장냉매가 증발기로 원활하게 유동하도록 하기 위하여, S5는 열리고 고압의 냉매가스가 저장소 1에 유입되어 저장냉매를 가압하게 된다.
- (3) 증발기에서 증발되는 냉매가스의 일부는 S3을 통하여 압축기로 유입되면서, 일부는 저장소 2

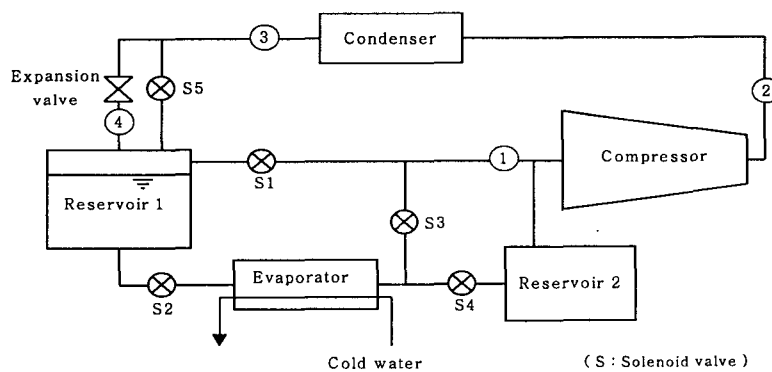


Fig. 1 Low-temperature low-pressure refrigerant storage system.

(Reservoir 2)로 유입되어 압축기 입구의 압력 상승이 억제된다.

2.3 공학적 설계

저온-저압 냉매 저장방식을 사용하는 초기 냉각장치의 구체적인 설계를 위하여 다음의 설계조건과 냉동사이클을 고려하였고, 이에 대하여 실제 시스템을 설계하였다.

2.3.1 설계조건

- (1) 냉매 : R-134a
- (2) 냉각 전 물의 입구온도 : 20°C
- (3) 냉각 후 물의 출구온도 : 5°C
- (4) 공급되는 총 냉수량 : 3 liter
- (5) 냉수의 유량 : 2.5 liter/min
- (6) 냉수발생시간, $\Delta t = 72$ s
- (7) 압축기 용량, $W_{Comp} = 1/3$ HP = 0.25 kW
- (8) 증발기에서 요구되는 전열량, $q_{Evap} = 2.625$ kW

2.3.2 기본 냉동사이클

저장소 1과 저장소 2가 없이 일반 냉동시스템과 같이 작동할 때의 정상상태 사이클은 다음과 같다고 가정을 하였고, 이를 Fig. 2의 엔탈피-압력 선도에 나타내었다. Fig. 2에서의 번호들은 Fig. 1에서의 각 지점들을 나타낸다.

- (1) 저압 : 2기압(포화온도 : -10°C)
- (2) 고압 : 12기압(포화온도 : 46°C)
- (3) 압축기 입구의 과열도 : 5°C

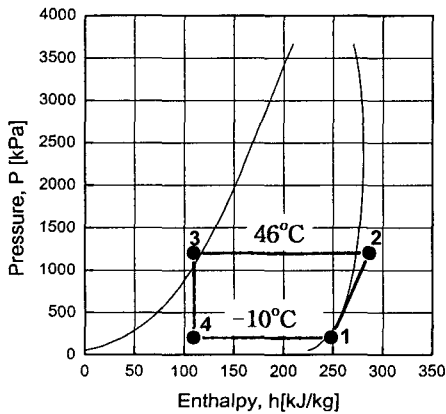


Fig. 2 P-h diagram for basic design of low-pressure refrigerant storage system.

- (4) 팽창밸브 입구의 과냉도 : 5°C

2.3.3 시스템 설계변수

- (1) 냉수발생이 없는 경우의 냉매유량, \dot{m}_{NC}
- 압축기 용량에 의해 결정된다.

$$\dot{m}_{NC} = \frac{W_{Comp}}{h_2 - h_1} = 0.0065 \text{ kg/s} \quad (1)$$

- (2) 냉수발생시 요구 냉매유량, \dot{m}_C
- 냉수발생시 증발기에서 요구되는 전열량에 의해 결정된다.

$$\dot{m}_C = \frac{q_{Evap}}{h_1 - h_{4,f}} = 0.0125 \text{ kg/s} \quad (2)$$

- (3) 냉수발생 여부에 따른 냉매유량의 비

$$\frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_{NC}} = \frac{0.0125}{0.0065} = 1.92 \quad (3)$$

- (4) 냉수발생시 사이클의 변화가 없다는 가정 하에 증발기에 유입되어야 하는 냉매의 총 질량, m_C

$$m_C = \dot{m}_C \Delta t = 0.9 \text{ kg} \quad (4)$$

- (5) 저장소 1의 체적, V_{R1}
- 팽창 후 포화 액체상태의 냉매가 수용될 수 있는 저장소의 체적으로서, 포화액체의 밀도를 고려하여 결정한다.

$$V_{R1} = \frac{m_C}{\rho_{4,f}} = 0.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (5)$$

- (6) 저장소 2의 체적, V_{R2}
- 냉매가스가 완전히 수용될 수 있는 저장소의 체적으로서, 압축기 입구에서의 냉매가스의 밀도를 고려하여 결정한다.

$$V_{R2} = \frac{m_C}{\rho_1} = 92.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (6)$$

앞서의 계산결과에서 알 수 있듯이, 냉수발생 시 압축기 입구의 압력 상승을 완전히 억제하기 위한 저장소 2의 요구체적은 너무 크기 때문에, 정수기의 냉동시스템으로서는 부적합하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 저장소 2의 체적을 10 liter로 설정하였고, 냉매가스의 저장성능을 향상시키기 위하여 저장소 2의 내부에 흡착제(adsorbent)인 실리카겔을 충전하였다.⁽¹⁾

3. 실험장치

실험장치는 일반 냉동시스템의 주요 구성요소들을 포함하여 두 개의 저장소, 냉매의 유동을 제어하기 위한 솔레노이드 밸브들로 구성되어 있다. 또한 구성요소들 사이에서의 냉매의 상태량을 측정하기 위하여 온도센서 및 압력센서들을 설치하였다. Fig.3은 본 논문 연구에서의 실험장치를 나타내고 있다. Fig.3에서 알 수 있듯이 본 실험장치에서는 7개의 솔레노이드 밸브, 각각 8개의 온도센서 및 압력센서를 설치하였다. 또한 증발기 출구에서의 냉매유량을 측정하기 위하여 질량유량계를 설치하였으며, 증발기에서 냉각되는 물의 유량과 입구, 출구온도의 측정을 위한 센서들을 설치하였다. 저장소 1은 1 liter의 내부 체적을 지닌 실린더 형태로 제작되었으며, 저장된 저

온의 냉매를 진공 단열하였다. 또한 내부에 저장된 냉매의 수위도 실시간으로 측정하였다.

4. 실험방법

냉매의 저장이 완료되면, 쾌속 냉각장치 시스템은 저장된 냉매를 증발기로 유동하게 하여, 증발기로 들어오는 물을 순간 냉각시킨다. 이때 응축기와 솔레노이드 밸브 7 사이에 존재하는 니들 밸브(Needle valve)의 개도를 적절히 조절함으로써 저장된 냉매는 압축기로부터 공급되는 고압의 냉매에 의하여 증발기로 원활하게 유동할 수 있게 된다. 본 실험에서는 증발기를 통과하는 냉매가 시간이 지남에 따라서 감소하는 점을 감안하여 72 초 중 50초가 경과하였을 때, 니들 밸브의 개도를 크게 함으로써 후반부에 냉매가 더 많이 흐를 수 있도록 하였다. 냉수발생이 완료되면 냉매를 저장소 1에 다시 저장한다. 증발기를 통하여 유동하는 물은 일정온도로서 유입되도록 준비하였다.

5. 실험결과

5.1 냉매수위

냉수발생시 저장소 1의 내부에 저장된 냉매의

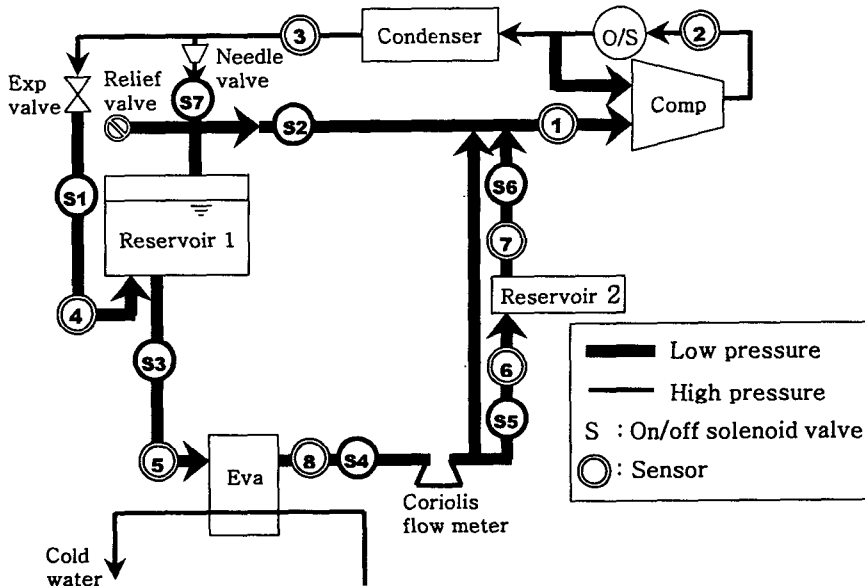


Fig. 3 Experimental setup.

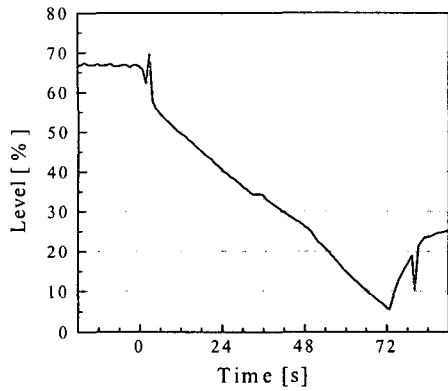


Fig. 4 Variation of level of refrigerant in Reservoir 1.

수위변화는 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 냉매는 냉수발생 동안에 선형적으로 감소하였으며, 50초 부근에서 니들 밸브의 개도 증가에 의하여 냉매 수위의 감소율이 변화하는 것을 Fig. 4로부터 알 수 있다.

5.2 질량유량

냉수발생시 증발기를 통하여 유동하는 냉매의 질량유량은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 측정되었다. 50초 부근에서 니들 밸브의 개도가 증가함으로써 냉매유량이 증가하는 것을 확연히 알 수 있다. 이러한 니들 밸브 개도의 증가는 냉각과정의 후반부에서 냉매유량의 감소에 의한 쾌속 냉각효과 감소를 억제하게 된다.

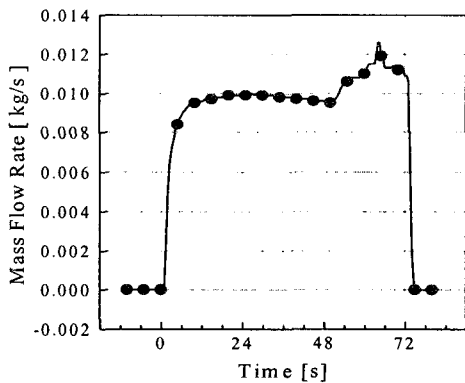


Fig. 5 Variation of mass flow rate of refrigerant through the evaporator.

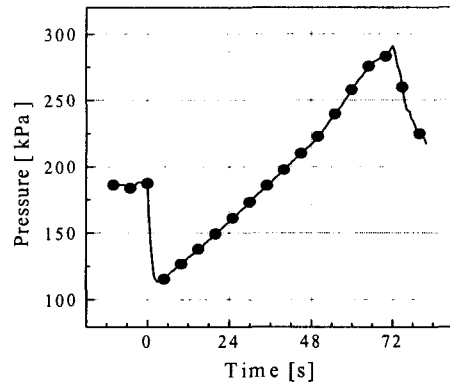


Fig. 6 Variation of inlet pressure of compressor.

5.3 압축기 입구압력

Fig. 6은 쾌속 냉각과정 동안 압축기 입구에서의 압력변화를 나타낸 것이다. 저장된 냉매가 증발기로 많이 유입되는 과정은 시간이 지남에 따라서 압축기 입구의 압력을 증가시킬 수 있으므로, 증발기를 통과하는 냉매의 유량은 감소하려는 경향이 있다. 이러한 냉매유량의 감소현상을 억제하기 위하여 앞에서 언급하였듯이 저장소 2가 요구되었으며, Fig. 6에서의 압력 증가는 저장소 2의 존재로 인하여 압력 증가율이 훨씬 감소된 결과라고 할 수 있다.

5.4 물의 온도

Fig. 7은 증발기로 유입되는 물의 입구온도와

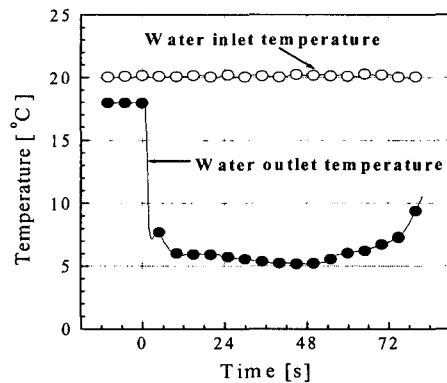


Fig. 7 Variation of inlet and outlet temperature of water.

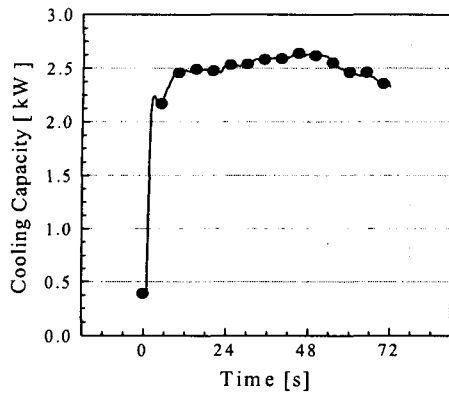


Fig. 8 Variation of cooling capacity in the evaporator.

출구온도를 나타낸 것이다. 물의 입구온도는 72초 동안 20℃로서 일정하게 유지되었다. 물의 출구온도는 72초 동안의 전반부와 후반부에 5℃ 이상의 값을 나타내고 있지만, 전반적으로 5℃ 정도에서 유지되는 것을 Fig. 7로부터 알 수가 있다. 따라서 이 결과로부터 저온-저압 냉매 저장 방식에 의해서 쾌속 냉각이 성공적으로 이루어졌다는 것을 알 수가 있다.

5.5 냉동용량

증발기에서의 열교환량, 즉 순간적인 냉동용량의 변화는 Fig. 8에 계산되어 있다. 이 결과는 물

의 입구온도와 출구온도의 차이로부터 산출된 결과이다. 본 논문에서 요구한 순간 쾌속 냉각능력은 2.625 kW이었으며, 그림으로부터 이와 유사한 값이 72초 동안 비교적 잘 획득되었음을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는, 저온-저압 냉매 저장 방식을 이용한 초기 냉각장치를 설계하고 제작하는 내용을 소개하였으며, 이에 대한 실험결과로부터, 일정시간 동안 압축기 용량 이상의 쾌속 냉각이 성공적으로 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문의 연구는 웅진 코웨이 주식회사의 지원과 KAIST 연소기술연구센터(CERC)의 후원으로 수행되었으며, 이에 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. Ko, J. and Jeong, S., 2003, Experimental investigation on small-scale sorption refrigerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 312-317.