

2차 냉매로 천연냉매 R744를 사용하는 냉동시스템의 성능 특성 Performance Characteristics of Refrigeration System Using R744 as a Secondary Refrigerant

이문빈** · 조환** · 윤정인* · 최인수*** · 손창효*†

Wen-Bin Yi**, Hwan Jo**, Jung-In Yoon* In-Soo Choi*** and
Chang-Hyo Son*†

(접수일 : 2014년 01월 24일, 수정일 : 2014년 02월 26일, 채택확정 : 2014년 02월 26일)

Abstract: In this paper, the performance characteristics of R404 indirect refrigeration system using R744 as a secondary refrigerant were investigated experimentally to obtain a optimum design data for this system. First, for the constant experimental conditions, the COP of R404A indirect refrigeration system using R744 as secondary refrigerants decreases with respect to the increases in R404A condensation temperature and temperature difference in R744 cooler. And, the COP of indirect refrigeration system using R744 as secondary refrigerants decreases slightly with decreasing the mass flowrate of R744.

Key Words : R744, R404A, Secondary Refrigerant, COP(Coefficient of performance), Performance Characteristics

1. 서 론

간접 냉동시스템(Indirect Refrigeration System)은 주로 대형 할인마트나 냉동창고에 사용되는 것으로, 물품 냉각을 위한 2차 냉매(브라인)로는 단상 브라인이 사용되어 왔다. 하지만 이러한 단상 브라인들은 냉각온도가 감소할수록 점도 증가로 인해 펌프 소비동력이 상당히 커진다. 따라서, -30℃ ~ -50℃의 저온에서도 점도가 크지 않는 R744를

2차 냉매로 사용하기 위한 연구가 진행 중에 있다.¹⁻²⁾

지금까지 발표된 R744 2차 냉매용 간접 냉동시스템의 관련 연구³⁻⁴⁾를 살펴보면, 대부분 R744 2차 냉매순환시스템의 펌프동력과 열전달에 대한 것으로, 간접 냉동시스템의 성능 특성을 분석 및 파악한 연구는 거의 전무한 실정이다. 그리고 아직까지 이에 대한 확실한 이론이 확립되어 있지 않은 상태이다.

*† 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과

**이문빈, 조환 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원생

***최인수 : 동명대학교

*† Chang-Hyo Son(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University.

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*Jung-In Yoon : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University.

**Wen-Bin Yi, Hwan Jo : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PuKyung National University, Graduate student.

***In-Soo Choi : TongMyong University

따라서 본 논문에서는 2차 냉매로서 R744를 적용한 R404A용 간접 냉동시스템의 성능 특성을 파악하기 위해서, 동일한 실험조건에서 R404용 냉동시스템의 성능 특성을 분석한다. 이를 통해 R744를 2차 냉매로 사용하는 R404A용 간접 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

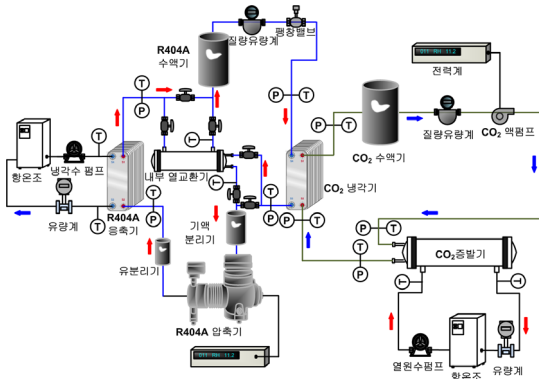


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 R744를 2차 냉매로 사용하는 R404A용 간접 냉동시스템의 성능 특성을 파악하는데 필요한 자료를 얻기 위해서 고안된 것이다. Fig. 1에 나타낸 것처럼, 이 간접 냉동시스템은 크게 냉매가 R404A인 1단 압축 1단 팽창 증기압축식 냉동시스템과 R744를 2차 냉매로 사용하는 시스템으로 구성된다. R404A 냉동시스템은 압축기, 응축기, R744냉각기(R404A 증발기, R744 응축기), 내부 열교환기, 팽창밸브, 수액기, 기액분리기(Accumulator) 등으로 구성되고, R744용 2차 냉매 시스템은 R744 냉각기, 수액기, 냉매펌프, R744 증발기로 이루어져 있다.

이 간접 냉동시스템 내의 냉매 순환 과정은 두 개로 구분하여 설명할 수 있다. 먼저 1단 압축 1단 팽창 증기압축식 냉동시스템 내의 R404A 순환 과정을 살펴보면 수액기에 과냉 상태로 충전된 R404A가 압축기에 의해 순환된다. 그리고 수액기

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Values
Condensing temperature of R404A[°C]	30~50
Subcooling degree of R404A [°C]	5
Superheating degree of R404A [°C]	5
Efficiency of internal heat exchanger	0.3~0.7
Mass flow rate of R404A [kg/min]	2.9~3.5
Temperature difference of R744 cooler [°C]	1~9
Subcooling degree of R744 [°C]	5
Superheating degree of R744 [°C]	5
Evaporation temperature of R744 [°C]	-30~-10
Mass flow rate of R744 [kg/min]	1~1.5

를 나온 냉매액은 질량유량계를 지나서 냉매의 유량과 밀도를 측정하여 R404A의 냉매 상태를 확인하고 팽창밸브로 냉매를 팽창시킨다. 그 후 R744 냉각기에서는 R744 가스와 열교환한 후 내부 열교환기로 유입된다(바이패스가 없는 경우). 이때 내부 열교환기에서는 응축기에서 나온 냉매액과 열교환한 후 과열된 증기가 기액분리기와 압축기로 들어간다. 압축기에서 압축된 고온고압의 냉매증기는 응축기에서 열원수와 열교환한 후 내부열교환기를 지나서 수액기로 들어간다. 다음으로, R744 2차 냉매 시스템 내의 R744 순환을 설명하면, R744용 수액기를 나온 냉매액은 펌프의 구동에 의해서 질량 유량계로 유입되고 질량유량계를 나온 냉매액은 R744 증발기로 들어간다. R744증발기에서는 열원수(브라인)와 열교환한 후 R744냉각기로 보내어져 액화된다. 이때 냉매액은 과냉각되어 다시 R744용 수액기로 들어간다.

본 시스템에 사용된 각종 열교환기에서의 냉매와 2차 냉매의 온도는 T형 열전대를 사용해서 측정하였다. 절대압 측정기는 증발기를 비롯한 각종 열교환기의 출입구에 설치하였으며, 압축기와 펌프의 소비동력은 전력계를 이용해 측정하였다. 자료 수집과 시스템 제어를 위해서 자료 획득 장치와 컴퓨터를 이용하였다. Table 1은 본 연구의 간접 냉동시스템의 운전 조건을 나타낸 것이다.

2.2 데이터 해석

본 연구에서 사용한 R404A와 R744의 열물성치

값 계산은 NIST에서 개발한 냉매 물성치 계산 프로그램인 REFPROP(version 8.01)⁵⁾를 이용하였고, R744 2차 냉매 시스템의 성능을 파악하기 위한 실험 데이터의 분석으로 다음과 같은 계산식을 사용하였다. 우선, R404A 냉동시스템의 응축열량은 식 (1)로 계산하였다.

$$Q_{R404A,c} = G_{R404A} \cdot (h_{R404A,c,in} - h_{R404A,c,out}) \quad (1)$$

여기서, G_{R404A} 는 냉각수와 R404A의 질량유량 [kg/s]이다. 그리고 $h_{R404A,c,in}$ 와 $h_{R404A,c,out}$ 는 각각 R404A 응축기 입구와 출구에서의 냉매 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다.

R404A용 증발열량($Q_{R404A,e}$)은 아래의 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$Q_{R404A,e} = G_{R404A} \cdot (h_{R404A,e,out} - h_{R404A,e,in}) \quad (2)$$

여기서, $h_{R404A,e,in}$ 와 $h_{R404A,e,out}$ 는 각각 R404A 증발기 입구와 출구에서의 냉매 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다.

R744 2차 냉매 시스템의 응축열량($Q_{R744,c}$)은 식 (3)으로 계산하였다.

$$Q_{R744,c} = G_{R744} \cdot (h_{R744,c,in} - h_{R744,c,out}) \quad (3)$$

여기서, G_{R744} 는 R744의 질량유량 [kg/s]이다. 그리고 $h_{R744,c,in}$ 와 $h_{R744,c,out}$ 는 각각 R744용 응축기 입구와 출구에서의 냉매 엔탈피 [kJ/kg]을 나타낸다.

R744 증발기 열교환량은 R404A 응축기에서와 마찬가지로 다음의 식 (4)로 계산하였다.

$$Q_{R744,e} = G_{R744} \cdot (h_{R744,e,out} - h_{R744,e,in}) \quad (4)$$

여기서, $h_{CO_2,e,in}$ 와 $h_{CO_2,e,out}$ 는 각각 R744 증발기 입구와 출구에서의 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다.

본 시스템의 성능계수는 두 개로 나뉘어져 있다. R404A 냉동 시스템 성능계수(COP_{R404A})와 전

시스템의 성능계수($COP_{R404A+CO_2}$)이다. R404A 냉동시스템의 성능계수는 보통 1단 압축 1단 팽창 냉동시스템과 동일하고 식 (5)로 계산하였다. 전 시스템의 성능계수는 Lin과 Jiang⁶⁾에 의해서 식 (6)과 같이 계산하였다. 식 (6)과 같이 분자의 값으로 R744 증발기 열량을 사용하는 이유는 전 시스템에서 R744 증발기 열량의 값이 우리가 직접 사용하는 열량 값으로 전 시스템에서 가장 중요한 변수이기 때문이며, 압축기와 펌프소비동력을 분모의 값으로 사용하는 이유는 전체 냉동시스템에 투입되는 일이 압축기뿐만 아니라 펌프도 포함되어 있기 때문이다.

$$COP_{R404A} = \left(\frac{Q_{R404A,e}}{W_{com}} \right) \quad (5)$$

$$COP_{R404A+CO_2} = \left(\frac{Q_{CO_2,e}}{W_{com} + W_{pump}} \right) \quad (6)$$

여기서, W_{R404A} 는 압축기 소비동력 [kW]이고 W_{pump} 는 펌프의 소비동력 [kW]이다.

3. 결과 및 고찰

본 절에서는 R744를 2차 냉매로 사용하는 간접 냉동시스템의 성능 특성을 분석하여, 이에 대한 기초 설계 자료를 제공하고자 한다. 따라서 R404A 응축온도, R744 냉각기온도차, R744 질량유량의 변화에 따른 성능계수를 살펴보았다.

3.1 R404A 응축온도의 영향

Fig. 2는 동일한 조건(R744 증발온도($T_{CO_2,e}$) -20°C, R744 냉각기온도차($\Delta T_{CO_2,cooler}$) 5°C, 내부열교환기 효율(η_{HX}) 0.58, R404A 냉동시스템 및 R744 2차 냉매시스템의 과냉각도($T_{R404A,sup}$, $T_{CO_2,sup}$), 과열도 ($T_{R404A,sub}$, $T_{CO_2,sub}$) 5°C)에서 R404A 응축온도의 증가에 따른 R404A 냉동시스템의 성능계수(COP_{R404A}), 간접 냉동시스템의 성능계수($COP_{R404A+CO_2}$), R404A 증발열량($Q_{R404A,e}$),

압축기소비동력(W_{com}), 펌프소비동력(P_{pump})을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 R404A 응축온도가 5°C 씩 증가함에 따라, R404A 냉동시스템의 성능계수와 간접 냉동시스템의 성능계수는 각각 대략 9.5%, 9.3% 씩 감소함을 알 수 있다. 이는 R404A 응축온도가 5°C 씩 증가할 때 R404A 증발열량은 약 3.4% 씩 감소하고 압축기 소비동력은 약 9.9% 씩 증가하기 때문이다. 여기서 R404A 증발열량이 감소하는 이유는 동일한 조건에서 R404A 응축온도가 증가함에 따라 응축기 출구 엔탈피(h_3)가 증가하기 때문이고, 압축기 소비동력이 증가하는 이유는 동일한 조건에서 R404A 응축온도가 증가함에 따라 압축비가 증가하기 때문이다. 그리고 동일한 R404A 응축온도에서 COP_{R404A} 는 $COP_{R404A+CO_2}$ 보다

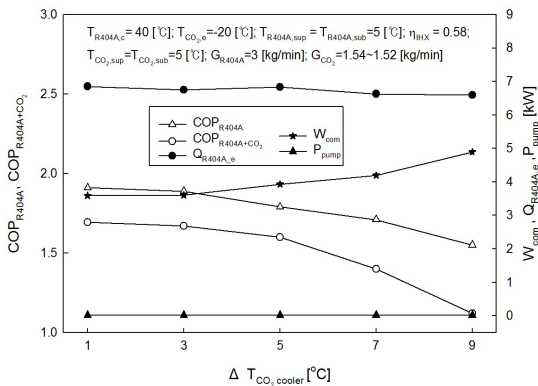


Fig. 4 Effect of R744 cooler temperature difference.

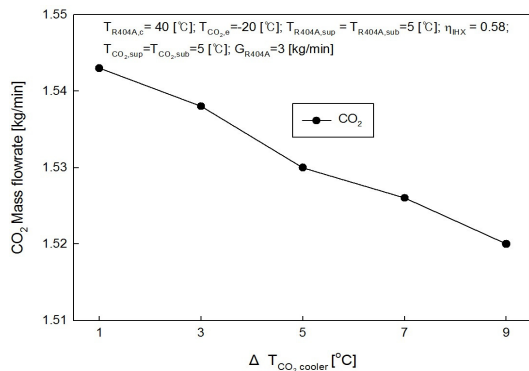


Fig. 5 The change of R744 mass flowrate with R744 cooler temperature difference.

크게 나타난다. 이는 R744 냉각기 및 배관의 열손실 때문에 $Q_{R404A,e}$ 는 $Q_{R744,e}$ 보다 큰 것으로 판단된다. 또한, 펌프소비동력은 압축기소비동력에 비해 아주 작기 때문에 그래프 상에서 일정하게 보인다. 그러나 R404A 응축온도가 30°C에서 50°C까지 변화할 때 R744의 질량유량이 감소하기 때문에 펌프소비동력은 약 14%를 감소한다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 동일한 조건에서 R404A 응축온도가 증가함에 따라 R404A 응축기 출구 엔탈피(h_3)가 증가하기 때문에 R404A 증발열량이 감소하게 된다. 그리고 R744 2차 냉매시스템 내의 조건도 동일하기 때문에 에너지 밸런스에 의해 R744 질량유량이 감소하게 되는데, Fig. 3에 나온 것과 같이 R404A 응축온도가 30°C에서 50°C로 증가함에 따라 약 13.6% 감소함을 알 수 있다.

3.2 R744 냉각기 온도차의 영향

Fig. 4는 동일한 조건(R404A 응축온도($T_{R404A,c}$) 40°C, R744 증발온도($T_{CO_2,e}$) -20°C, 내부열교환기 효율(η_{HX}) 0.58, R404A 냉동시스템 및 R744 2차 냉매시스템의 과냉각도($T_{R404A,sup}$, $T_{CO_2,sup}$), 과열도($T_{R404A,sub}$, $T_{CO_2,sub}$) 5°C)에서 R744 냉각기 온도차의 증가에 따른 R404A 냉동시스템의 성능계수 (COP_{R404A}), 간접 냉동시스템의 성능계수 ($COP_{R404A+CO_2}$), R404A 증발열량($Q_{R404A,e}$), 압축기소비동력(W_{com}), 펌프 소비동력(P_{pump})을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, R744 냉각기 온도차가 5°C 씩 증가함에 따라 R404A 냉동시스템의 성능계수 및 간접 냉동시스템의 성능계수는 각각 약 4.3%, 4.2% 씩 감소함을 알 수 있다. 이는 R404A 응축온도가 5°C 씩 증가함에 따라 R404A 증발열량은 약 0.1% 씩 감소하고 압축기 소비동력은 약 4.9% 씩 증가하기 때문이다. 여기서 R404A 증발열량이 감소하는 이유는 동일한 조건에서 R404A 증발온도의 감소에 따라 R404A 증발기 출구의 엔탈피(h_6)가 감소하기 때문이고, 압축기 소비동력이 증가하는 이유는 압축비가 증가하

기 때문이다. 그리고 펌프 소비동력은 압축기 소비동력에 비해 아주 작기 때문에 Fig. 4에서 일정한 것처럼 보이지만 R744 냉각기 온도차가 1°C ~ 9°C로 증가할 때 펌프 소비동력은 약 0.6% 감소한다. 이는 동일한 조건에서 R744 냉각기 온도차의 증가에 따라 R404A 증발열량이 감소하게 되고, R404A 냉동시스템과 R744 2차 냉매 시스템의 에너지 밸런스에 의해 R744 질량유량이 감소하기 때문이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, R744 질량유량은 R744 냉각기 온도차가 1°C ~ 9°C로 증가함에 따라 약 0.5% 감소함을 알 수 있다.

3.3 R744 질량유량의 영향

Fig. 6은 동일한 조건(R404A 응축온도($T_{R404A,c}$) 40°C, R744 증발온도($T_{CO_2,e}$) -20°C, R744 냉각기

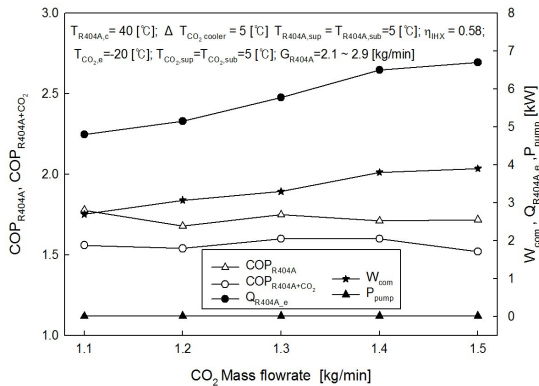


Fig. 6 Effect of mass flow rate of R744.

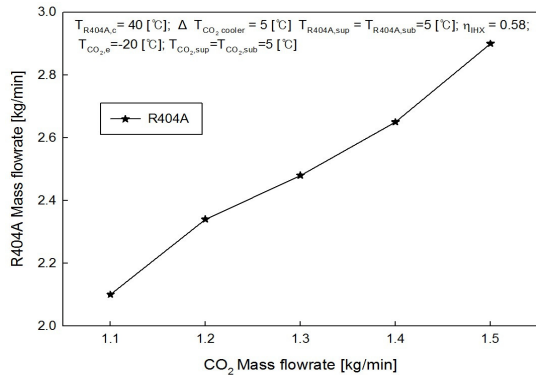


Fig. 7 The change of R404A mass flowrate with R744 mass flowrate.

온도차($\Delta T_{CO_2,cooler}$) 5°C, 내부열교환기 효율(η_{HX}) 0.58, R404A 냉동시스템 및 R744 2차 냉매시스템의 과냉각도($T_{R404A,sup}$, $T_{CO_2,sup}$), 과열도($T_{R404A,sub}$, $T_{CO_2,sub}$) 5°C)에서 R404A 응축온도 증가에 따른 R404A 냉동시스템의 성능계수(COP_{R404A}), 간접 냉동시스템의 성능계수($COP_{R404A+CO_2}$), R404A 증발열량($Q_{R404A,e}$), 압축기 소비동력(W_{com}), 펌프 소비동력(P_{pump})을 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, R744 질량유량이 증가함에 따라 R404A 냉동시스템의 성능계수와 간접 냉동시스템의 성능계수는 아주 미세하게 감소한다. 이는 동일한 조건에서 R404A 증발열량과 압축기 소비동력은 R744 질량유량이 1.1 kg/min ~ 1.5 kg/min로 증가할 때 약 39.5%, 40.9% 거의 일정한 비율로 증가하기 때문이다. 여기서 R404A 증발열량과 압축기 소비동력이 증가하는 이유는 R744 질량유량의 증가함에 따라 에너지 밸런스를 맞추기 위해 R404A 질량유량은 증가하기 때문이다. 또한 펌프 소비동력의 증가는 R404A 증발열량과 압축기 소비동력의 증가에 비해 작지만 R744 질량유량이 1.1 kg/m ~ 1.5 kg/min로 증가할 때, 약 36.1%를 증가하였다. R744 질량유량의 증가에 따른 R404A 질량유량의 변화는 Fig 7과 같이 나타나며, R744 질량유량이 1.1 kg/min ~ 1.5 kg/min로 증가함에 따라 약 35.7% 증가함을 알 수 있다.

위에 설명한 것을 종합해보면, R404A 응축온도, R744 냉각기 온도차의 증가에 따라 R404A 냉동시스템의 성능계수 및 간접 냉동시스템의 성능계수시스템의 성능계수는 감소하고 R744 질량유량의 증가는 R404A 냉동시스템의 성능계수 및 간접 냉동시스템의 성능계수에 대한 영향이 아주 미세하다. 그리고 각 실험에 펌프 소비동력의 증감 비율로부터 알 수 있듯이, R744의 점성계수보다는 R744 질량유량은 펌프 소비동력에 대한 영향이 더 크다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차 냉매인 R744를 사용하는 간접 냉동시스템의 R404A 응축온도, R744 냉각기온도차, R744 질량유량 등의 인자들이 시스템의 성능에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 살펴보았다. 따라서 본 연구에 대한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

일정한 실험 조건에서 R404A 응축온도, R744 냉각기온도차가 증가할수록 R404A 냉동시스템 및 간접 냉동시스템의 성능계수는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. R744 질량유량의 증가에 따라 R404A 냉동시스템 및 간접 냉동시스템의 성능계수는 감소하지만 감소량이 아주 미세한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

“이 논문은 2013학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(C-D-2013-1337)”

References

1. S. F. Pearson, 1995, "Cooling Method and Apparatus", British patent Number 2258298.
2. A. C. Pachai, 2004, "Experience with R7₄₄ as refrigerant in supermarkets", In: Proceedings of the sixth IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Glasgow, United Kingdom, August 29-September 1.
3. D. Hinde, S. Zha, L. Lan, 2008, "R7₄₄ experiences in North American supermarkets", In: Proceedings of the Eighth IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Denmark, pp. 1098-1104.
4. H. Kruse, 2000, "Refrigerant use in Europe", ASHRAE J., Vol. 42, pp. 16-25.
5. EES: Engineering Equation Solver, 2006, fChart Software Inc.
6. L. Lin and S. Jiang, 2008, "Discussion about

utilizing R744 as low temperature secondary refrigerant", *Chine, Refrigeration and Air Conditioning*, Vol. 8, No. 4, pp. 24-27.