

단일유로 멀티사이클 및 바이패스유로 멀티사이클 적용 냉동시스템의 성능특성에 관한 실험적 연구

송 영 승, 정 해 원, 윤 원 재, 김 용 찬^{*†}

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Single-Circuit Multi Cycle and a Bypass Two-Circuit Multi Cycle

Youngseung Song, Haewon Jung, Wonjae Yoon, Yongchan Kim^{*†}

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-713, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received December 14, 2010; revision received June 15, 2011)

ABSTRACT: The object of this study is to investigate the performance characteristics of refrigerators using a single-circuit multi cycle and a bypass two-circuit multi cycle. Each refrigeration cycle was tested by varying secondary fluid mass flow rate and temperature. Based on the experimental data, the optimum refrigerant charge was 48 g and the COP at the optimum secondary fluid mass flow rate was 1.53 for the single-circuit multi cycle. For freezer(F)-only mode, both the single-circuit multi cycle and the bypass two-circuit multi cycle were operated at overcharge conditions, resulting in an increase of the secondary fluid mass flow rate. The maximum COPs of the single-circuit multi cycle and the bypass two-circuit multi cycle were 1.22 and 1.35, respectively. The COP increased by 10.7% with the application of the bypass two-circuit multi cycle.

Key words: Single-circuit multi cycle(단일유로 멀티사이클), Bypass two-circuit multi cycle(바이패스유로 멀티사이클), COP(성능계수), Refrigerator(냉장고)

기 호 설 명

C_p : 비열 [kJ/kg · K]
 D_i : 관 내경 [mm]
 L : 길이 [mm]
 m : 질량유량 [kg/h]
 Q : 냉동용량 [W]
 T : 온도 [°C]
 t : 두께 [mm]

W : 압축기 소비전력 [W]

하첨자

brine : 2차 유체
comp : 압축기
f : 냉동실
r : 냉장실

† Corresponding author

Tel.: +82-2-921-5946; fax: +82-2-921-5946

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

1. 서 론

전 세계적으로 에너지고갈 및 지구온난화 문제에

대한 국제적인 환경규제가 강화되고 있고, 또한 생활수준의 향상으로 인해 가정용 냉장고는 고급화 및 대형화 되고 있다. 이러한 흐름에 따라 환경 유해물질을 배출하지 않는 친환경 냉매의 사용과, 에너지 소비 절감을 위한 냉동 시스템의 고효율화에 대한 연구의 중요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 이유로 친환경 냉매인 R600a를 적용한 냉동시스템에 대한 연구와, 냉장실, 냉동실 증발기를 각각 사용하는 멀티사이클의 유로 변경을 통한 소형 냉동시스템의 최적 설계에 대한 연구가 필요하다.

탄화수소계 천연냉매인 R600a는 기존냉매인 R-134a에 비해 지구온난화 효과가 적지만, 가연성이 좋기 때문에 소형 냉동시스템에 적용할 시 안정성이 가장 큰 관심사였다. Gigiel et al.⁽¹⁾은 유럽표준에 의거하여 R600a를 적용한 소형 냉동시스템의 안정성에 관한 연구결과를 발표하였으며, Lee et al.⁽²⁾은 프로판과 이소부탄 혼합냉매를 가정용 소형 멀티 냉동 시스템에 적용하여 안정성을 입증하였다.

단일유로 멀티사이클 및 바이패스유로 멀티사이클은 기존에 널리 사용된 단일 증발기 사이클에 비해 효율 및 냉장실 고내 습도 면에서 장점을 가지고 있다. Lee et al.⁽³⁾은 단일유로 멀티사이클이 단일 증발기를 갖는 사이클에 비해 효율이 높고 냉장실 고내 상대습도를 45%로 유지시킬 수 있는 장점이 있다고 발표하였다. 그러나 두 개의 증발기가 단순히 연속적으로 연결되어 있기 때문에 효율과 고내

습도의 상승이 크지 않다는 단점을 가지고 있다. Kim et al.⁽⁴⁾은 바이패스유로 멀티사이클 적용 시 높은 냉장실측 증발온도로 인해 단일유로 멀티사이클의 1.5배, 단일증발기 사이클에 비해 2.8배의 고습도 유지가 가능하고, 소비전력이 26% 감소한다고 보고하였다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 단일유로 멀티사이클의 냉장실 고내온도 변화, 냉동실 풍량 변화 및 냉장실 팬 정지 운전에서의 냉동실 풍량 변화에 따른 성능특성을 실험적으로 고찰하였다. 또한 냉동시스템의 성능개선을 위하여 바이패스 멀티유로 사이클을 적용하고 냉동 단독운전 모드에서의 냉동실 풍량 변화에 따른 성능특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 제시한 단일유로 멀티사이클 및 바이패스유로 멀티사이클은 Fig. 1과 같이 크게 압축기, 응축기, 3방향 밸브, 2개의 모세관, 2개의 증발기 및 SLHX로 구성되어 있다.

단일유로 멀티사이클은 압축기에서 고온 고압으로 압축된 냉매가 응축기에서 응축된 후 3방향밸브를 통과하여 냉장측 모세관을 지나면서 냉장실측 증발온도까지 팽창되어 냉장실 증발기에서 냉장실 부

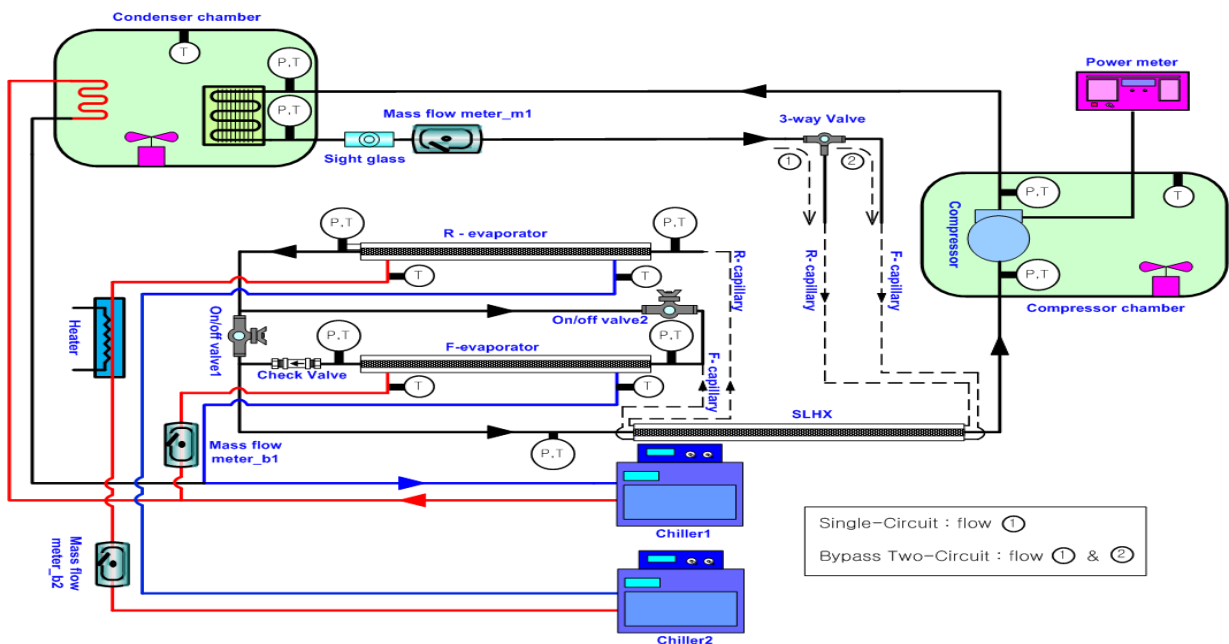


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 1 Specification of the single-circuit multi cycle and bypass two-circuit multi cycle

Component	Specification
Refrigerant	R600a
Compressor	Reciprocating comp. (SGEC) 15.3 cc/rev
Condenser	L1800, Spiral fin type
Evaporator	F-room Di6.35 × t0.5 × L1400
	R-room Di6.35 × t0.5 × L700
Capillary	Di0.85 × L3300

하를 흡열한다. 냉장실 부하를 흡열한 냉매는 냉동실 증발기에서 냉동실 부하를 흡열하여 압축기로 다시 유입된다.

바이패스유로 멀티사이클은 냉매의 흐름에 따라 2가지 방법으로 운전된다. 냉장-냉동 동시운전모드는 단일유로 멀티사이클과 동일한 유로를 통해 운전되며, 냉장실 부하가 모두 충족되면 냉동 단독운전모드로 전환되어 3방향 밸브를 통과한 냉매가 냉동측 모세관을 지나 냉동실측 증발온도까지 팽창된다. 팽창된 냉매는 냉동실 증발기에서 냉동실 부하를 흡열하여 냉장-냉동 동시운전모드에서 충족하지 못한 냉동실 부하를 흡열하게 된다.

실험장치는 연결배관에서 미소 열손실을 방지하기 위해 모든 냉매배관을 단열하였다. 각각의 증발기는 이중관식 열교환기를 사용하여 용량조절이 쉽도록 하였으며, 실제 작동환경 및 상용 가정용냉장고의 사양을 고려하여 냉동실 증발기의 전열면적이 냉장실에 비해 2배가 되게 설계하였다. 열부하는 2차유체인 브라인(물/에틸렌글리콜 혼합액)을 이용하여 열교환이 이루어지도록 하였다. 브라인의 온도조절을 위해 냉동기(chiller)를 설치하였고, 전력 측정기(power meter)를 이용해 소요동력을 측정하였다. Table 1은 주요부품의 사양을 나타낸다.

2.2 실험방법 및 성능계산

Table 2는 수행된 실험의 조건이며, 모든 실험은 응축기측 외기온도를 25℃, 압축기 회전수를 2400 rpm로 고정한 상태에서 수행하였다. 단일유로 멀티사이클은 다음과 같이 세 가지 실험을 진행하였다. 냉동실 고내온도 변경 실험에서는 냉장실과 냉동실 동시 운전 시 냉장실 부하를 모두 충족한 후에도 냉동실

Table 2 Test conditions

	R-Evaporator	F-Evaporator
Concentration of brine	Ethylene glycol 50.4% /Water 49.6%	
Temp. of brine	5~-1℃	-15℃
Mass flow rate of brine	10 kg/h	10~50 kg/h
Evaporating temp.	-20~24℃	-20~-28℃
Ambient temp.	25℃	

부하가 충족될 때까지 냉장실을 운전할 때 나타나는 냉장실 고내온도 감소에 따른 성능변화를 측정하였다. 따라서 최적충전량인 48 g의 냉매를 충전한 상태에서 냉장실측 브라인의 온도를 5℃부터 -1℃까지 1℃씩 감소시키면서 실험을 수행하였다. 냉동실 풍량 변경 실험은 최적충전량의 냉매로, 냉동실의 풍량 증가를 위하여 냉동실측 브라인의 유량을 10 kg/h부터 30 kg/h까지 5 kg/h씩 증가시키면서 냉동실 풍량 증가에 대한 성능특성을 고찰하였다. 냉장실 부하가 모두 충족되면 냉장실 고내온도 감소 방지를 위해 냉장실 팬을 정지한 상태로 운전하여 냉동실 부하만 충족시킬 수 있다. 이 때의 성능특성을 알아보기 위해 냉장실 증발기로 브라인이 흐르지 않는 상태에서 냉동실측 브라인 유량을 10 kg/h부터 50 kg/h까지 10 kg/h씩 증가시키는 실험을 진행하였다.

바이패스유로 멀티사이클의 적용 시 냉동 단독운전모드에서 성능특성을 고찰하기 위해 냉장-냉동 동시운전모드에서의 최적충전량과 냉동 단독운전모드에서의 최적충전량을 비교하는 실험을 수행하였다. 또한, 냉동 단독운전모드에서도 냉장-냉동 동시운전모드의 최적충전량으로 운전되므로 냉매 과충전에 의한 성능저하를 해결하기 위해 냉동실측 브라인의 유량을 10 kg/h부터 50 kg/h까지 10 kg/h씩 증가시키면서 냉동실 풍량 변경에 따른 성능특성을 측정하였다.

냉동시스템의 성능특성을 측정하기 위해 주요부분의 온도, 압력 및 유량을 측정하였다. 온도측정은 T형 열전대를 사용하였으며 정밀도는 ±0.4℃이다. 압력측정은 디지털식 압력계를 사용하였고 정밀도는 ±0.22%이다. 유량측정은 코리올리 효과를 이용한 질량유량계를 사용하였으며 냉매 유량계는 ±0.5%, 2차유체 유량계는 ±0.1%의 정밀도를 갖는다. 압축기 소비전력은 적산전력계를 사용하였고 정밀도는 0.01%이다. 모든 데이터는 안정 상태에서 2초 간격으로 10

본 동안 수집한 데이터의 평균값을 사용하였다.

냉동시스템의 냉동용량은 식(1)과 같이 증발기 외부를 흐르는 2차 유체(물/에틸렌글리콜 혼합액)의 열전달량을 통하여 계산하였고, 성능계수(COP)는 식(2)와 같이 냉동용량과 소비전력의 비로써 계산하였다.

$$Q = C_{p,f,brine}m_{f,brine}\Delta T_{f,brine} + C_{p,r,brine}m_{r,brine}\Delta T_{r,brine} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q}{W_{comp}} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉장실 고내온도 변화에 따른 성능특성

단일유로 멀티사이클에서 냉장실 부하가 모두 충족된 후 냉동실 부하를 충족시킬 때까지 냉장실이 운전될 경우 냉장실의 고내온도 감소가 나타난다. 이러한 고내온도 감소에 따른 냉동시스템의 성능특성을 알아보기 위해 냉장실 증발기로 들어가는 브라인 온도를 감소시키는 실험을 실시하였다.

Fig. 2는 냉장실측 브라인 온도 감소에 따른 냉매 유량의 변화와 냉매와 브라인 간의 온도차이의 변화를 나타낸다. 브라인의 온도가 5°C에서 -1°C로 감소하면 증발압력의 감소로 인해서 압축기 입구 비체적이 증가하게 되어 냉매유량은 6% 감소하였다. 또한 브라인 온도가 5°C에서 -1°C로 감소할 때 증발온도는 -19.8°C에서 -21.4°C로 1.6°C 감소하게 되

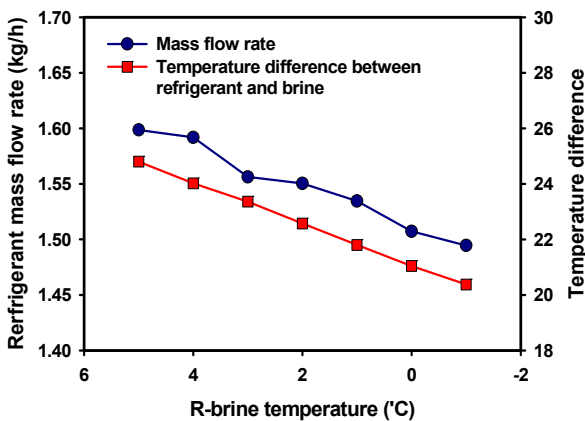


Fig. 2 Variations of refrigerant mass flow rate and temperature difference between refrigerant and brine with R-brine temperature.

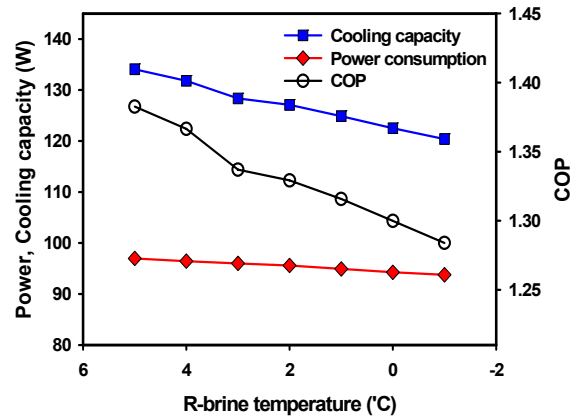


Fig. 3 Variations of power consumption, cooling capacity and COP with R-brine temperature.

어 냉매와 브라인의 온도차이가 줄어들게 되며, 이는 증발기에서의 냉매와 브라인간의 열전달률 저하를 가져온다.

Fig. 3은 냉장실측 브라인 온도 변화에 따른 소비전력, 냉동용량 및 COP의 변화를 나타낸 것이다. 브라인 온도가 5°C에서 -1°C까지 감소하면 냉매유량이 감소함에 따라 소비전력과 냉동용량 모두 감소하지만, 소비전력이 3.3% 감소한 것에 비해 냉동용량의 경우 냉매와 브라인간의 온도차 감소로 인해서 10.2% 감소하여 COP는 1.38에서 1.28로 7.14% 감소하였다.

3.2 냉동실 풍량 변화에 따른 특성

단일유로 멀티사이클에서 냉동실 풍량 증가에 따른 성능특성을 고찰하기 위해 냉동실측 브라인 유량을 증가시키는 실험을 진행하였다. Fig. 4는 브라인 유량 변화에 따른 소비전력, 냉동용량 및 COP의 변화를 나타낸다. 브라인 유량이 증가함에 따라 소비전력은 큰 변화가 나타나지 않지만 냉동용량은 증가하는 경향을 보였다. 브라인 유량 20 kg/h에서 냉동용량은 브라인 유량 10 kg/h에 비해 6.4% 증가하였고, 그 이상에서는 성능향상이 나타나지 않았다. 이는 브라인 유량 증가에 따라 증발기 출구온도가 상승하여 증발기 출구측에서 냉매가 부하를 흡열하지 못하기 때문이다. COP는 냉동용량과 마찬가지로 브라인 유량이 10 kg/h에서 20 kg/h로 증가하였을 때 1.45에서 1.53으로 5.4% 증가하였고, 20 kg/h 이상에서는 성능향상이 보이지 않았다.

Fig. 5는 브라인 유량 증가에 대한 냉동실/냉장실 냉동용량 비율 변화를 나타낸다. 브라인 유량이 증

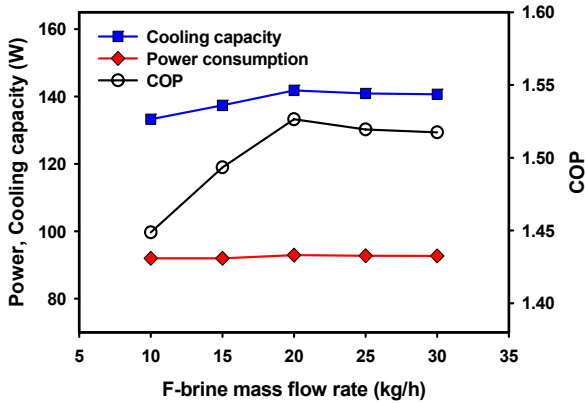


Fig. 4 Variations of power consumption, cooling capacity and COP with F-brine mass flow rate.

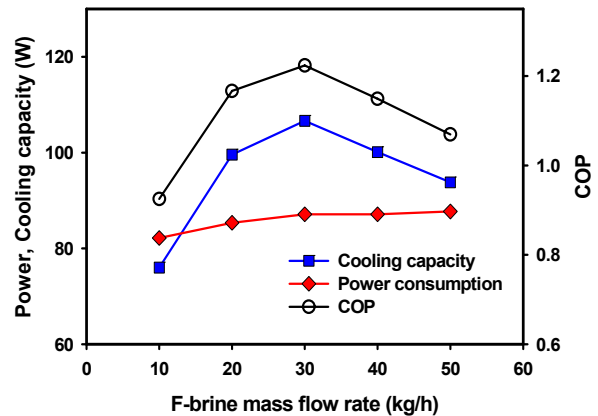


Fig. 6 Variations of power consumption, cooling capacity and COP with F-brine mass flow rate.

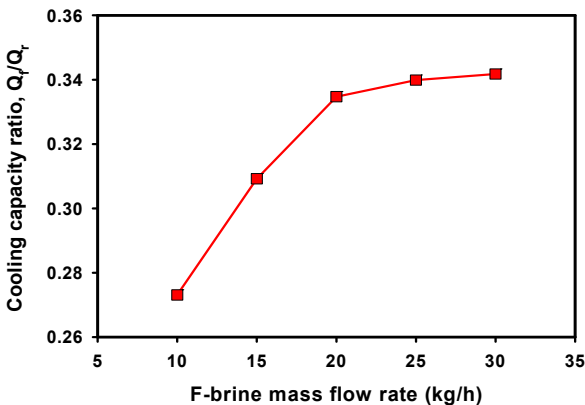


Fig. 5 Variation of cooling capacity ratio with F-brine mass flow rate.

가하면서 냉동실측 냉동용량이 커짐에 따라 냉동실/냉장실 냉동용량 비율은 증가하여 10 kg/h에서 30 kg/h로 증가할 때 0.27에서 22.6% 증가한 0.34를 보였다. 따라서 냉장-냉동 동시운전 시 냉동실 팬 풍량을 증가시키는 경우 냉동실 부하 충족시간이 짧아지는 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

3.3 냉장실 팬 정지, 냉동실 풍량 변경 시 운전 특성

냉장-냉동 동시운전에서 나타난 냉장실 고내온도 감소를 방지하고자 냉장고 팬 정지운전에 대한 성능특성을 고찰하였다. 냉장실 증발기로 브라인이 흐르지 않는 상태에서 냉동실측 브라인 유량 증가에 따른 소비전력, 냉동용량 및 COP의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 소비전력은 브라인 유량 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 냉동용량은 브라인 유

량이 10 kg/h에서 30 kg/h로 증가할 때 76 W에서 106.6 W로 40% 증가하였고, 브라인 유량 30 kg/h 이상에서는 증발기 출구온도의 상승으로 인해 냉동용량이 감소하였다. COP는 냉동용량이 최대로 나타나는 브라인 유량 30 kg/h에서 1.22로 최대값을 나타냈으나, 냉장-냉동 동시운전에 비해 COP가 낮게 나타났다기 때문에 유로변경을 통한 성능향상이 필요하다고 판단된다.

3.4 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전 특성

바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전으로의 모드 변경 시 유로가 변경되기 때문에 냉장-냉동 동시운전과 최적충전량이 다르게 나타난다. Fig. 7에 바이패스유로 멀티사이클의 냉장-냉동 동시운전모드와 냉동 단독운전모드에서의 충전량 변화에 따른 COP의 변화를 나타내고 있다. 냉동 단독운전모드에서 최적충전량은 냉장-냉동 동시운전모드의 최적충전량인 48 g에 비해 25% 감소한 36 g으로 나타났다. 이러한 최적충전량의 차이는 냉동 단독운전모드에서 냉매가 냉장실 증발기를 지나지 않으므로 냉장-냉동 동시운전모드에 비해 시스템의 내용적이 감소하고, 유로가 단순해서 유로저항이 작기 때문이다. 따라서 냉장실 부하를 충족시킨 후 냉동 단독운전모드로의 전환 시 냉매가 과충전된 상태로 운전된다.

냉매 과충전으로 인한 성능저하를 보완하고자 냉동실 풍량 증가에 따른 성능특성을 고찰하였다. Fig. 8은 냉동실측 브라인 유량 변화에 대한 소비전력, 냉

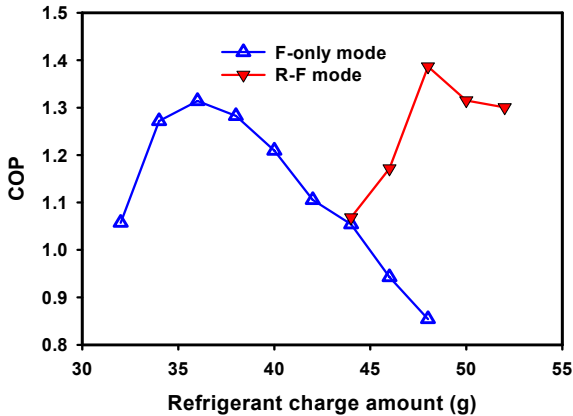


Fig. 7 Variation of COP with refrigerant charge amount for R-F mode and F-only mode.

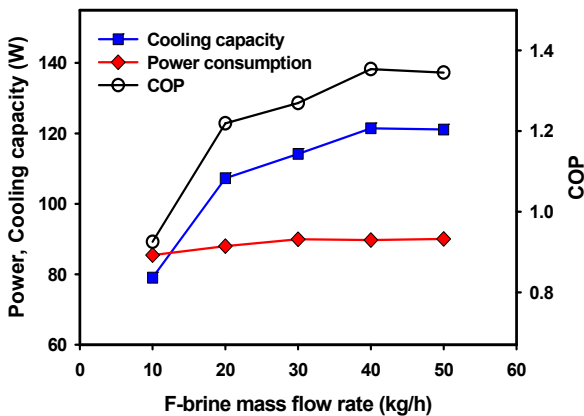


Fig. 8 Variations of power consumption, cooling capacity and COP with F-brine mass flow rate.

동용량 및 COP의 변화를 나타낸다. 소비전력과 냉동용량 모두 브라인 유량이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타난다. 브라인 유량이 10 kg/h에서 50 kg/h로 증가하면 소비전력은 5.4% 증가하지만, 냉동용량은 53.2% 증가하여 과충전된 상태로 운전하는 냉동 단독운전모드에서는 냉동실의 풍량을 증가시켰을 때 시스템의 냉동용량이 크게 개선되는 것으로 나타났다. 소비전력은 서서히 증가하는데 비해 냉동용량의 증가폭이 크기 때문에 COP는 브라인 유량을 10 kg/h에서 50 kg/h로 증가시켰을 때 0.93에서 1.35로 45.4% 증가하였다.

3.5 유로변경에 따른 냉동 단독운전 비교

Table 3은 단일유로 멀티사이클의 냉장실 팬 정

Table 3 Cycle performance data in F-only mode

	Single-circuit	Bypass two-circuit
Mass flow rate	1.28 kg/h	1.59 kg/h
Compression ratio	9.35	8.88
Power consumption	87.14 W	90.02 W
Cooling capacity	106.63 W	121.08 W
COP	1.22	1.35

지운전과 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전 시 최대 성능을 내는 팬 풍량일 때의 성능특성을 나타낸다. 냉매유량은 단일유로 멀티사이클의 냉장실 팬 정지운전에 비해 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전의 경우 22.7% 높게 나타났는데, 이는 시스템의 내용적이 작고 유로가 단순하여 유로저항이 작기 때문이다. 유로저항의 차이로 인해 압축비는 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전에서 단일유로 멀티사이클의 냉장실 팬 정지운전에 비해 5% 낮게 나타났다. 냉매유량의 증가에 따라 소비전력과 냉동용량은 단일유로 멀티사이클의 냉장실 팬 정지운전에 비해 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전에서 각각 3.3%, 13.5% 증가하였다. 소비전력에 비해 냉동용량의 증가 폭이 큰 것은 압축비 감소에 따라 압축기 효율이 증가하였고, 또한 냉매가 냉장실 증발기를 경유하지 않으므로 압력 손실이 작기 때문이다. COP는 냉동용량의 증가로 인해 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전모드에서 10.7% 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 단일유로 멀티사이클의 냉장실 고내온도 변화, 냉동실 풍량변화, 냉장실 팬 정지운전 시 냉동실 풍량변화와 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전모드에서의 냉동실 풍량 변화에 따른 성능특성을 고찰하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 단일유로 멀티사이클에서 냉장실측 브라인 온도를 5°C에서 -1°C까지 감소시킨 결과 COP는 1.38에서 1.28로 7.14% 감소하였다.

(2) 단일유로 멀티사이클에서 냉동실측 브라인 유량을 증가시켰을 때 브라인 유량 20 kg/h에서 성능계수는 1.53으로 나타났고, 그 이상 유량을 증가시키도 성능향상이 보이지 않았다. 냉동실/냉장실 냉동용량 비율은 브라인 유량이 10 kg/h에서 30 kg/h로

증가할 때 0.27에서 22.6% 증가한 0.34로 나타났고, 따라서 냉장-냉동 동시운전에서 냉동실 풍량 증가 시 냉동부하를 충족시키는 시간이 줄어들 것으로 판단된다.

(3) 단일유로 멀티사이클의 냉장실의 팬 정지 운전에서 냉동실측 브라인 유량을 증가시킨 결과 브라인 유량 30 kg/h에서 1.22로 최대의 성능계수를 가졌지만, 냉장-냉동 동시운전에 비해 성능이 낮게 나타났다.

(4) 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전모드에서는 냉장-냉동 동시운전모드에 비해 최적충전량이 25% 감소하였다. 냉동 단독운전 시에도 냉장-냉동 동시운전모드의 최적충전량으로 운전하므로 과충전에 의한 성능저하가 나타나며, 냉동실측 브라인 유량을 50 kg/h까지 증가시킨 결과 성능계수가 1.35로 향상된다. 따라서 냉동실 풍량을 증가시켜 과충전에 의한 성능저하를 상쇄시킬 수 있다고 판단된다.

(5) 단일유로 멀티사이클의 냉장실 팬 정지운전에 비해 바이패스유로 멀티사이클의 냉동 단독운전의 성능계수가 10.7% 높게 나타났다. 따라서 바이패스유로 멀티사이클 적용 시 단일유로 멀티사이클에 비해 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Gigiel, A., 2004, Safety testing of domestic refrigerators using flammable refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 621-628.
2. Lee, M. and Ki, S., 2005, A study on performance characteristics of propane/isobutane refrigerant mixtures in a domestic small multi-refrigeration system, *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 271-278.
3. Lee, H. M., Lee, H. W. and Lim, J. H., 1996, High efficiency multi-evaporator cycle and control of a refrigerator, *Proceedings of the International Appliance Technical Conference, West Lafayette*. IN
4. Kim, C. N., Kim, Y. Y., Lee, J. S., Bae, H. K., Kim, M. W., and Park, Y. J., 2003, A study on the performance of refrigerator with time divided multi-evaporator and expansion cycle, *Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference*, pp. 1261-1266.