

바이패스유로 멀티사이클을 적용한 냉동시스템의 성능특성에 관한 연구

김 기 열, 정 해 원, 김 용 찬**

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학부

Performance Characteristics of a Bypass Two-Circuit Refrigeration System

Kiyoul Kim, Haewon Jung, 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 23, 2008; revision received May 6, 2009)

ABSTRACT: The purpose of this study is to investigate the performance characteristics of a bypass two-circuit refrigerator. A bench scale refrigeration system was designed and constructed to estimate possible performance improvement of the bypass two-circuit refrigerator. The experiments were conducted in the bench scale refrigeration system by varying capacity of the condenser and refrigerant charge amount with an adoption of a refrigerant storage vessel. The COPs of the bypass two-circuit refrigeration system in the refrigerator and freezer (RF)-mode and freezer(F) only-mode were increased by 10% and 17%, respectively, with increasing the capacity of the condenser. Besides, the COP of the system in the F only-mode was increased by 10% by adopting the refrigerant storage vessel.

Key words: Bypass two-circuit cycle(바이패스유로 멀티사이클), Refrigerant charge(냉매충전량), COP(성능계수), Refrigerator(냉장고)

기 호 설 명

하첨자

C_p : 비열 [kJ/kg · K]
 D : 직경 [mm]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 L : 길이 [mm]
 m : 질량유량 [kg/hr]
 Q : 열전달율 [W]
 T : 온도 [°C], 두께 [mm]
 W : 압축기 소비전력 [W]

$evap$: 증발기
 F : 냉동축
 i : 입구축
 o : 출구축
 R : 냉장축
 $2nd$: 2차 유체축

1. 서 론

근래에 생활수준 향상과 건강 및 편의 생활에 대한 관심이 높아짐에 따라 소형 냉동시스템을 비롯한 가전제품들은 고급화 및 대형화되기 시작했으며, 최근에는 그 추세가 더욱 확대되고 있다.

† Corresponding author

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

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

또한, 국제적인 환경규제에 대응하기 위하여 에너지를 절감하고 환경 유해물질을 방출하지 않는 환경 친화형 가전제품이 요구되고 있다. 소형 냉동시스템에 있어서 친환경의 의미는 두 가지로 해석될 수 있으며, 첫째는 환경문제를 유발하지 않는 작동유체의 사용이며, 둘째로 효율 극대화를 통한 에너지 절감을 뜻한다.

그에 따라 환경유해물질의 방출을 방지를 위해 탄화수소계 냉매인 R600a를 적용한 냉동시스템의 연구가 진행되어왔으며, 에너지 절약형 기술로 두 가지(냉동 및 냉장실) 온도영역에서 효율적인 운전 및 동시냉각이 가능한 바이패스유로 멀티사이클(Bypass Two-circuit Cycle, BTC)에 대한 연구가 진행되었다.

탄화수소계 천연냉매(이소부탄, R600a)를 사용한 소형 냉동시스템이 처음 소개되었을 때 소형 냉동시스템의 안정성이 주된 관심사였으며, Gigiel et al.⁽¹⁾은 유럽 표준 (EN/IEC 60335-2-24 : 2001)에 의거하여 R600a 냉매를 적용한 소형 냉동시스템의 안전성에 관한 연구결과를 발표하였다. Lim et al.⁽²⁾은 프로판/이소부탄 혼합냉매를 적용한 가정용 냉장고의 성능 향상에 관한 연구를 진행하였다. 이들은 혼합냉매를 적용하였을 때, 조성비에 따라 R12에 비해 1.7%~2.4% COP가 증가한다고 발표하였다. Lee et al.⁽³⁾은 프로판과 이소부탄의 혼합냉매를 가정용 소형 멀티 냉동시스템에 적용하여, 안정성을 입증하였다. 혼합냉매는 R134a보다 액체밀도가 낮음으로써, 열전달 성능을 향상시

켜 에너지 소비를 줄일 수 있으며, 냉매 충전량을 줄여 원가절감이 가능함을 보였다. 또한 높은 열전달 특성을 기반으로 소비전력이 9~13% 감소하는 효과를 나타냈다.

바이패스 유로방식은 기존 직렬식 냉각방식에 비하여 냉장실 습도를 높게 유지할 수 있으며, 냉동 및 냉장실의 팽창장치를 개별적으로 적용함으로써 사이클 제어 능력을 향상시키고 고내의 제품 보존능력을 크게 향상시킬 수 있다.

멀티사이클에서 바이패스유로의 적용은 냉동시스템의 고효율화에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다. Kim et al.⁽⁴⁾은 바이패스유로 멀티사이클을 적용하여 단일증발기 사이클에 비하여 고습도 유지가 가능하며, 소비전력량이 26% 감소한다고 보고하였다. 또한 Noguchi et al.⁽⁵⁾은 소형 냉동시스템에 2단 압축을 적용한 병렬유로의 구성을 통하여 소비전력이 10% 감소한다고 보고하였다.

본 연구에서는 냉장고의 고효율화를 위하여 R600a를 적용한 바이패스유로 멀티사이클의 냉매 충전량, 냉매저장소, 응축기 용량 및 압축기 회전수에 따른 성능변화를 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 제시한 바이패스유로 멀티사이클 적용 냉동시스템의 구성도를 나타낸다.

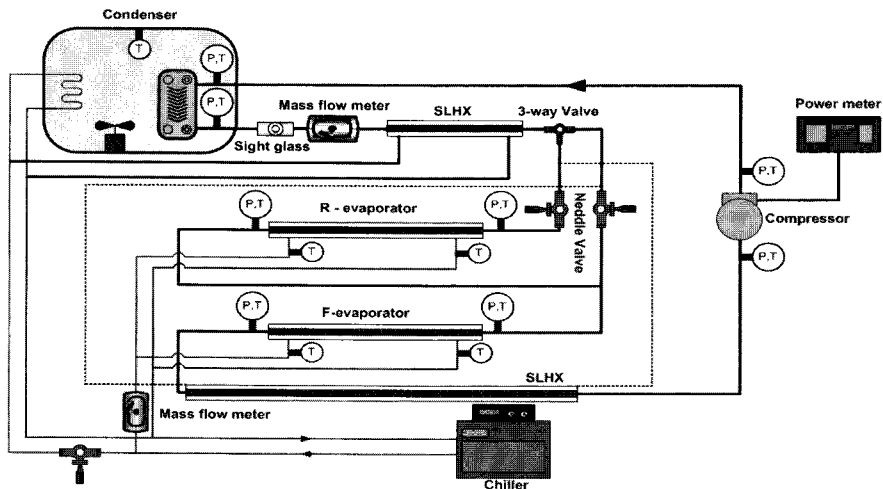


Fig. 1 Schematic diagram of bypass two-circuit cycle.

냉동시스템의 시험부는 증발부하량, 압축기 회전수, 팽창변 및 과냉각도를 변화시킬 수 있도록 설계하였다.

바이패스유로 멀티사이클은 냉매의 유동에 따라 2가지 방법의 운전조건을 갖고 있다. 냉장-냉동 동시운전모드(RF-mode)는 기존의 직렬형(serial-type) 냉각방식과 동일한 방법으로 냉매가 냉장측 모세관을 지나 냉장실 증발기(refrigerating evaporator)에서 1차 증발한 후 중간 모세관을 지나 냉동실 증발기(freezing evaporator)에서 2차 증발하여 냉장실과 냉동실 부하를 흡열한다. 냉장-냉동 동시운전모드에서 냉장실측 부하가 먼저 모두 냉장실 증발기로 흡열되면, 3방향 밸브가 전환되어 냉동 단독운전 모드(F only-mode)로 운전하며, 냉매가 냉동측 모세관을 지나 냉동실 증발기에서 증발하는 과정으로 냉장-냉동 동시운전에서 흡열되지 못한 냉동실 부하를 흡열한다.

실험장치는 압축기, 응축기, 3방향 밸브, 2개의 모세관, 2개의 증발기 그리고 SLHX로 구성하였다. 연결배관에서 미소 열손실을 방지하기 위하여 모든 냉매 배관을 단열하였다. 각각의 증발기는 용량조절에 용이하도록 이중관 열교환기를 사용하였으며, 2차 유체인 물/에틸렌글리콜 혼합액에 의해서 부하를 공급하였다. Table 1은 실험 장치에 사용된 주요부품의 사양을 나타낸다.

위의 기본 구성요소 이외에 응축용량 조절을 위한 열교환기(HX)를 응축기의 출구단에 추가적으로 설치하였으며, 모세관 변경에 따른 성능 변화를 측정하기 위해 기존 모세관 전단에 수동 팽창 밸브를 추가적으로 설치하였다. 또한, 물/에틸렌글리콜의 온도조절을 위한 냉동기(chiller)와 시스템의 소요동력을 측정하기 위한 전력측정기(po-

wer meter)를 설치하였다. 실험장치의 설계 및 실험방법은 ANSI/AHAM HRF-1-2004⁽⁶⁾에 따른 조건을 기준으로 하였으며, Bansal et al.⁽⁷⁾이 제시한 실험방법을 참조하였다.

2.2 실험방법 및 성능계산

바이패스유로 멀티사이클의 성능을 측정하기 위한 모든 실험은 응축기측 외기온도를 30 °C, 냉장실 증발온도 -20 °C, 냉동실 증발온도 -25 °C로 고정한 상태에서 수행하였다. 냉매충전량 시험은 압축기 회전수를 2800 rpm으로 고정하고, 냉동시스템의 냉매 충전량을 변화시키면서 성능계수를 측정하였다. 냉매저장소 시험은 각 운전모드에서 최적 냉매 충전량을 유지하기 위하여 냉동 단독운전에서 불필요하게 과충전되어 있는 냉매를 저장할 수 있는 냉매 저장소를 설계하여 장착한 후 실험을 수행하였다. 시험조건은 냉장-냉동 동시운전에서의 최적 충전량인 45 g이 충전된 상태에서 압축기 회전수 2800 rpm으로 수행되었다. 압축기 회전수 변경실험은 사이클에서의 압축기 회전수 변화에 따른 성능특성의 변화를 측정하기 위해 충전량을 45 g으로 고정시키고, 냉매저장소를 장착한 상태에서 압축기의 회전수를 1500에서 3600 rpm까지 50 rpm 단위로 증가시켜가면서 실험을 수행하였다. 응축기 용량 증가에 따른 영향을 관찰하기 위하여 응축기 출구와 삼방밸브 사이에 열교환기를 추가로 설치하여 응축 용량을 증대시켜 과냉도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 추가적인 열교환기는 이중관 열교환기를 사용하였으며, 물/에틸렌글리콜 혼합물과 열교환을 통해 과냉도를 조절하였다. 이때 압축기 회전수와 냉동실 증발온도는 각각 2800 rpm과 -25 °C로 고정하였다.

냉동시스템의 냉동용량은 식(1)에 나타낸 바와

Table 1 Specifications of the bypass two-circuit cycle

Component	Specification
Refrigerant	R600a
Compressor	Reciprocating Comp. (SGEC) 15.3 cc/rev
Condenser	L1800, Spiral Fin type
Evaporator	Inner : D6.35 × T0.5 × L900
Capillary	Inner : D0.85 × L3300 (R/F)
Expansion valve	Hoke metering valve 1315G4Y

Table 2 Test conditions

Parameter	Test condition
T _s	30 °C
T _{cond}	45 ~ 48 °C
T _R	-20 °C
T _F	-25 °C
Q _R	80 ~ 120 W
Q _F	80 ~ 120 W

같이 외부를 흐르는 2차 유체(물/에틸렌글리콜 혼합액, 42%/58% 질량비)의 열전달량을 통하여 계산하였다. 증발기측 2차 유체의 입구 및 출구 온도의 평균값을 기준으로 산출된 비열과, 증발기 입구와 출구에서의 냉매 온도차를 측정하여 열전달량을 계산하였다. 냉동시스템의 성능계수(COP)는 식(2)와 같이 냉동용량과 소비전력의 비로써 나타낸다.

$$Q_{evap, 2^{nd}} = \dot{m}_{evap, 2^{nd}} C_p_{evap, 2^{nd}} (T_{evap, 2^{nd}, i} - T_{evap, 2^{nd}, o}) \quad (1)$$

$$COP = Q_{total} / W_{total} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉매충전량의 영향

Fig. 2는 냉장-냉동 동시운전모드와 냉동 단독 운전모드 각각의 운전모드에서 냉매충전량에 따른 성능계수를 나타낸 것이다. 냉장-냉동 동시운전(RF)모드에서의 성능계수(COP)는 냉매 충전량 45g에서 가장 높게 나타났으며, 과충전 되었을 때 냉동용량이 소비전력의 증가보다 증가 폭이 적어지게 되어 COP는 감소하게 된다. 냉동(F) 단독운전모드에서는 최적 냉매 충전량은 38g으로 나타났으며, 이때의 COP는 1.25를 나타내었다. 냉동 단독운전운전의 최적 충전량이 15% 정도 작은 것은 냉장-냉동 동시운전에서 보다 냉동 사이클의 내용적이 더 작으며, 단순한 유동경로를 가지고 있어서 유로저항이 적고 열손실이 적음을 보여주는 결과이다. 냉장-냉동 동시운전이 냉동 단독 운전

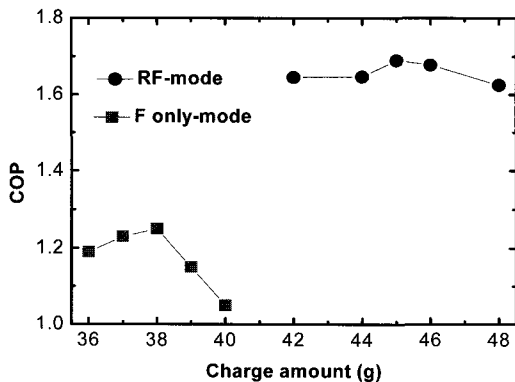


Fig. 2 Variation of COP with charge amount under RF-mode and F only-mode.

보다 약 30~40% 정도 높은 성능계수를 보이는 것은 냉장-냉동 동시운전이 냉동 단독운전 보다 넓은 증발온도 영역을 갖고 있음을 의미하고 있다. 하지만 일반적으로 냉장실측 부하가 냉동실측에 비하여 작은 소형 냉동시스템에서는 냉장실의 부하가 모두 흡열된 후의 동시운전은 무의미하며, 냉동 단독 운전을 통해 추가로 필요한 냉동실측 부하량을 흡열한다.

3.2 냉매저장소 장착의 영향

각 운전모드에서 최적 냉매 충전량을 유지하기 위하여 냉동 단독 운전에서 불필요하게 과충전되어 있는 냉매를 저장할 수 있는 냉매저장소를 설계하여 장착한 후 실험을 수행하였다. 냉매저장소는 삼방밸브와 냉동실측 모세관 사이에 설치하여, 냉동 단독운전모드에서 과충전된 냉매를 액체상태로 저장하게 된다. 냉매저장소는 운전모드 변화에 따른 최적 냉매충전량의 차이를 저장할 수 있도록 15cc의 용량으로 설계하였다.

Fig. 3은 냉매 저장소 장착에 따른 냉동사이클의 변화를 압력-엔탈피선도를 나타낸 것이다. 냉장-냉동 동시운전은 냉매저장소 장착에 따라 사이클의 변화가 없으며, 냉동 단독운전에서는 냉매 저장소 장착에 따라 증발온도 및 압력이 변화되고 있음을 확인할 수 있다. 냉매저장소의 장착

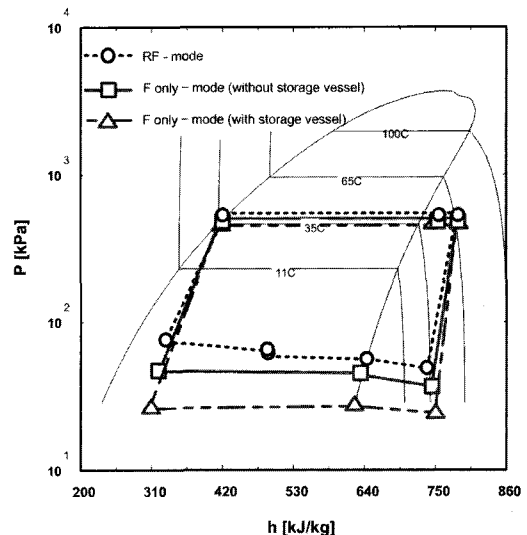


Fig. 3 Temperature change with cycle option (without and with storage vessel).

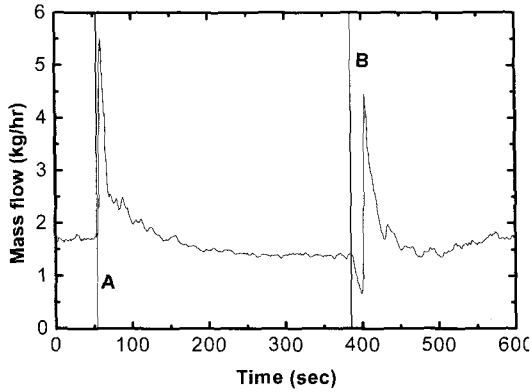


Fig. 4 Variation of mass flow rate with time.

에 따라 냉동 단독 운전모드 사이클이 장착전과 비교하여 최적조건으로 운전되고 있음을 알 수 있다. 냉매저장소 장착을 통하여 냉동 단독운전에서 성능계수가 10% 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

냉동 단독 운전에서 냉장-냉동 동시운전으로 모드 변경이 이루어졌을 때, 냉매저장소에 저장되어 있던 냉매가 다시 회수되어 사이클에 포함되어야 한다. Fig. 4는 시스템의 모드를 변경할 때 시간에 따른 유량변화를 나타내고 있으며, A지점을 기준으로 냉장-냉동 동시운전에서 냉동 단독운전으로 변환이 이루어졌고, 이는 냉매저장소의 영향으로 냉매유량이 20% 가량 감소함을 나타낸다. 그리고 냉동 단독운전에서 냉장-냉동 동시운전으로 재변환 되는 B지점이 후 안정화가 이루어지면 질량유량은 원래 냉장-냉동 동시운전 수준인 약 1.70 kg/h로 회복되었다. 이는 냉매저장소에 저장되어 있던 냉매가 운전모드 변경에 따라 효과적으로 사이클로 회수되었음을 나타낸다.

3.3 압축기 회전수의 영향

Fig. 5는 압축기 회전수에 따른 소비전력과 냉동용량을 운전모드에 따라 나타내었다. 냉장-냉동 동시운전에서 회전수 증가에 따라 냉동용량 및 소비전력이 동시에 증가하는 양상을 보이나 2800 rpm을 기준으로 더 높은 압축기 회전수에서는 냉동용량의 증가량이 소비전력의 증가보다 작아진다. 따라서 냉장-냉동 동시운전에서의 최적 압축기 회전수는 2800 rpm으로 판단할 수 있으며, 냉동 단독운전, 2600 rpm에서 COP는 냉장-냉

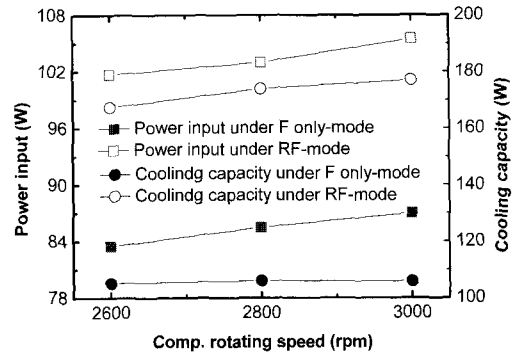


Fig. 5 Variation of power input and cooling capacity with comp. rotating speed.

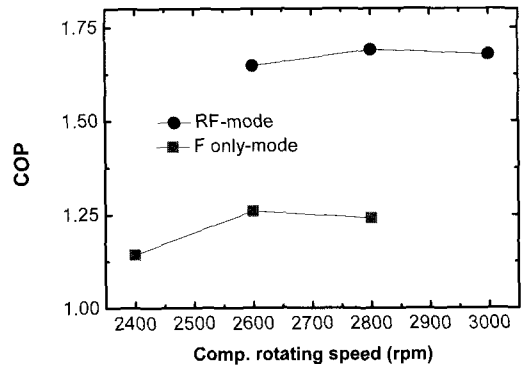


Fig. 6 Variation of COP with comp. rotating speed.

동 동시운전, 2800 rpm과 비교하여 약 1.9% 향상되는 것으로 나타났다. 이는 냉동 단독 운전시 냉동용량은 압축기 회전수에 크게 영향 받지 않는데 비하여 소비전력은 감소하여 성능계수가 향상되는 것으로 사료된다. Fig. 6은 압축기 회전수에 따른 운전모드별로 성능계수를 나타낸 것으로 냉장-냉동 동시운전에서는 2800 rpm, 냉동 단독 운전에서는 2600 rpm이 최적의 압축기 회전수로 나타났다.

3.4 응축기 용량증가의 영향

응축기 출구에 추가로 열교환기를 설치하여 응축기의 용량을 증가시키면서 시스템의 성능을 고찰하였다. 응축기 용량의 증가는 과냉도의 증가를 나타내며, 본 연구에서는 과냉도 증가(subcooling increase)를 변수로 하여 성능을 서로 비교하

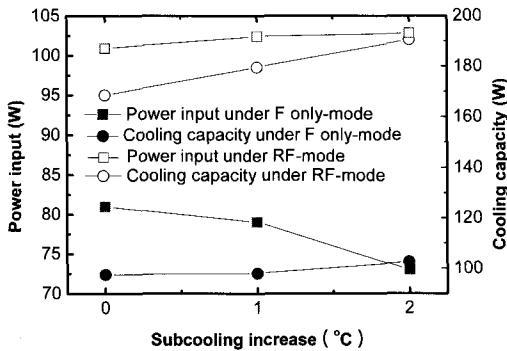


Fig. 7 Variation of power input and cooling capacity with the increase of subcooling.

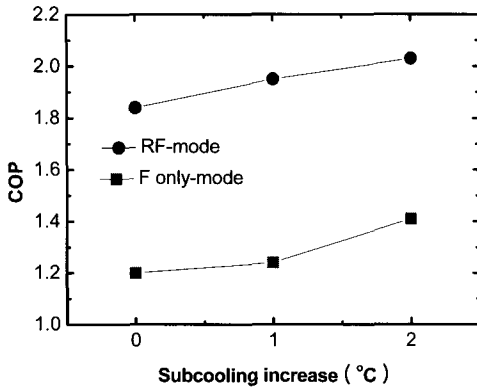


Fig. 8 Variation of COP with the increase of subcooling.

였다. Fig. 7과 Fig. 8은 추가 과냉도의 변화에 따른 각각 증발용량과 소요전력, COP를 나타낸다. 냉장-냉동 동시운전에서 추가 과냉도 2°C를 기준으로 모세관을 최적화시켰을 때, 증발용량은 3% 증가하였다. 이때 소비전력은 약 7% 감소하며, 그에 따른 성능계수는 10% 향상되었다. 냉동 단독운전모드에서는 증발용량이 5% 증가하였으며, 소비전력은 10% 감소하여, 성능계수는 17%까지 향상되었다. 하지만 추가 과냉도를 2°C 이상 증가시켜도 더 이상 성능향상이 나타나지 않아, 최적의 추가 과냉도가 존재하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 바이패스유로 멀티사이클의 성능특성을 냉매충전량, 냉매저장소 장착, 응축기 용량

증가를 통하여 고찰하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 냉장-냉동 동시운전과 냉동 단독운전에서 최적 냉매 충전량은 각각 45 g과 38 g으로 나타났으며, 이때 성능계수 각각 1.69와 1.25로 나타났다.

(2) 운전모드 변화에 따른 최적 냉매충전량의 차이를 보완하기 위하여 냉매저장소를 추가적으로 장착하였으며, 냉매저장소 설치에 따라 두 운전모드에서 동일한 최적냉매 충전량을 얻을 수 있어 약 10% 성능향상 효과를 나타내었다.

(3) 압축기 회전수를 변화시키면서 실험을 수행한 결과, 냉장-냉동 동시운전에서는 2800 rpm에서, 냉동 단독운전에서는 2600 rpm에서 최적 성능계수를 나타내었다.

(4) 응축기의 용량증가를 통하여 과냉도를 향상시킨 결과, 추가 과냉도 2°C에서 냉장-냉동 동시운전모드에서 약 10%, 냉동 단독운전모드에서 약 17% 까지 성능계수의 향상을 나타냈다.

참고문헌

- Gigiel, A., 2004, Safety testing of domestic refrigerators using flammable refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 621-628.
- Lim, B. H., Park, Y. B., Yoo, H. K., Jung, D. S., and Kim, C. B., 1995, Performance evaluation of R290/R600a mixture as a substitute for CFC12 in domestic refrigerator, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 249-265.
- Lee, M. and Ki, S., 2005, A study on performance characteristics of propane/isobutane refrigerant mixture in a domestic small multi-refrigeration system, *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 271-278.
- 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.
- Noguchi, A., 2004, Refrigerator with 2-stage

- parallel refrigeration cycle, Refrigeration, Vol. 79, No. 924, pp. 39-41.
6. ANSI/AHAM HRF-1-2004 (Revision of ANSI/AHAM HRF-1-2002), 2004, American National Standard, Energy, Performance and Capacity of Household Refrigerators, Refrigerator-Freezers and Freezers.
 7. Bansal, P. K. and Kuger, R., 2003, Developing new test procedures for domestic refrigerators : harmonization issues and future R&D needs-a review, International Journal of Refrigeration, Vol. 26, pp. 735-748.