

동시냉난방 히트펌프의 냉매 충전량과 운전모드 변화에 따른 성능특성에 관한 연구

송 인 식, 최 종 민^{*†}, 주 영 주^{**}, 정 현 준^{**}, 강 훈^{**}, 김 용 찬^{***}

한밭대학교 기계공학과 대학원, ^{*}한밭대학교 기계공학과, ^{**}고려대학교 기계공학과 대학원, ^{***}고려대학교 기계공학과

The Performance of a Simultaneous Heat and Cooling Heat Pump at Various Charging Conditions

In Sik Song, Jong Min Choi^{*†}, Young Ju Joo^{**}, Hyun Joon Chung^{**}, Hoon Kang^{**}, Yongchan Kim^{***}

Graduate School of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

*^{**}Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*^{***}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received March 19, 2008; revision received June 23, 2008)

ABSTRACT: The cooling load in winter is significant in many commercial buildings and hotels because of the usage of office equipments and the high efficiency of wall insulation. The development of a multi-heat pump that can cover heating and cooling simultaneously for each indoor unit is required. In this study, the performance of a multi-heat pump with 3-piping system was investigated as a function of refrigerant charge and its performance was analyzed in cooling mode, heating mode, and heat recovery mode. COP in the heating or cooling mode showed little dependence on refrigerant charge at overcharge conditions, while those were strongly dependent on refrigerant charge at undercharge conditions and outdoor inlet temperature. In the heat recovery mode, the performance of the system was very sensitive to charge amount at all conditions. Optimum charge amount in the heat recovery mode was 14% lower than that in the cooling mode at the standard condition because the refrigerant only passed the indoor units. It is required to store the excessive refrigerant charge in a storage tank to optimize the system performance at operating modes.

Key words: Charge(충전량), Heat pump(열펌프), COP(성능계수), Heating mode(난방모드), Cooling mode(냉방모드), Heat recovery mode(동시냉난방모드)

1. 서 론

국민의 소득증대와 생활수준의 향상으로 주거환

경 및 사무 공간의 쾌적성에 대한 요구 증대에 따라 설치공간과 공사비의 절감 및 에너지 절약 차원에서 다수의 실내·외기가 접속되는 시스템 열펌프의 개발과 보급이 증가하고 있다. 또한, 건축공학 및 건축자재 기술의 발전에 따라 최근 건물의 단열성능 향상과 함께 사무자동화 기기들의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1462

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

보급이 증가되고 있으며, 이로 인해 냉방이 필요한 기간이 장기화될 뿐만 아니라 겨울철에도 난방과 냉방이 동시에 요구되는 건물이 증가되고 있다. 특히, 호텔 또는 전산실과 같이 동일 기간에 냉방과 난방이 동시에 요구되는 공조공간이 증대되고 있다. 이와 같이 시스템 히트펌프는 냉방운전과 난방운전 및 동시냉난방 등의 다양한 운전모드를 조건을 포함하고 있다.

히트펌프 시스템의 성능을 향상시키려면 압축기의 효율이 높아야 하고 시스템을 구성하는 부품들이 서로 최적화되도록 설계하여야 하며, 적절한 냉매량을 시스템에 충전하여야 된다. 냉매충전량이 많거나 적은 경우 시스템의 성능이 저하되며 제품의 신뢰도를 저하시킬 수 있으므로 최적의 냉매량을 시스템에 충전시키는 것은 매우 중요하다.^(1, 2) 동시냉난방 히트펌프는 부하 및 운전모드에 따라 시스템 고압의 액상영역이 변화되므로 최적 충전량을 설정하는 데 어려움이 있다. 또한, 최근에는 히트펌프 시스템의 소형화와 냉매 충전량의 감소를 위하여 소형의 어큐플레이터를 사용하거나, 전자팽창밸브를 사용하는 시스템이 개발되고 있다.⁽³⁻⁵⁾

Houcek and Thedford⁽¹⁾는 최적충전량 이외의 영역에서는 시스템의 용량과 성능계수(COP)가 최적충전량에 비하여 점차 감소한다고 보고하였다. Stoecker et al.⁽²⁾은 최적충전량에서 모세관을 포함한 시스템과 TXV를 포함한 시스템의 성능을 비교하였으며, TXV를 팽창장치로 사용한 시스템의 계절성능(SEER)이 높게 나타난다는 결과를 얻었다. Choi and Kim⁽⁴⁾은 충전량 변화에 따른 냉매 유량변화가 시스템의 성능변화에 가장 큰 영향을 준다는 연구 결과를 발표하였다.

냉매 충전량과 관련한 연구는 대부분 단일 유닛 히트펌프의 냉방모드에 대해서만 수행되었다. 넓은 운전영역과 다양한 운전조건을 갖는 시스템 히트펌프나 이의 응용기술인 동시냉난방 히트펌프 사용증대에 따라 실내외기간의 배관 수가 다양하게 구성됨에 따라 다양한 부하조건 및 운전 모드에서 히트펌프의 성능 향상과 신뢰성을 확보하기 위하여 냉매 충전량 변화에 따른 시스템 히트펌프의 성능 특성에 관한 연구가 절실히 요구된다.

본 논문에서는 실내외기가 3관식 배관계로 구성된 4실형 동시냉난방 히트펌프를 설계 및 제작하여 운전모드와 충전량 변화에 따른 성능 특성

규명 및 냉매량 최적화를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

단일유닛 히트펌프와 달리 동시냉난방 시스템 히트펌프는 복수의 실내기 유닛을 가진다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 시스템 히트펌프의 개략도이다. 시스템 히트펌프는 실외유닛, 실내유닛 및 다양한 개별적 냉난방 부하요구에 대응하기 위하여 운전모드 변환유닛(MCU, Mode Change Unit)으로 구성하였다. 실외기와 실내기는 2관식 또는 3관식으로 연계 가능하나, 본 연구에서는 전체적인 배관수를 줄일 수 있는 3관식 시스템을 채용하였다. 시스템 히트펌프는 4실형으로 구성되며, R-410A를 작동유체로 사용한다. 히트펌프는 BLDC 로터리 압축기, 핀-튜브 열교환기로 구성된 4대의 실내기 및 팽창장치와 핀-튜브 실외 열교환기로 구성하였다. 팽창장치는 전자팽창밸브를 사용하였으며, 전자팽창밸브는 1~2상 여자 스텝모터로 구동되며, 500스텝까지 개도가 조절된다.

본 연구에서 채용한 3관식 시스템 히트펌프는 운전모드 변환유닛을 이용하여 4대의 실내기가 다양한 냉난방모드로 조합되어 사용가능하나, 본 연구에서는 4대의 실내기 모두 냉방 또는 난방으로 운전되는 냉방전용모드와 난방전용모드 및 2대의 실내기는 난방으로 운전되고 2대의 실내기는 냉방으로 운전되는 동시냉난방모드에 대해서 충전량 변화에 따른 성능 실험을 실시하였다. 동시냉난방모드 운전 시에 실외기가 일부 사용되기도 하지만, 본 연구에서는 운전모드 변화에 따른 냉매량 최적화를 위한 기초 설계 자료 확보를 위하여 다른 운전모드에 비하여 냉매 순환루프가 가장 짧은 실외기가 사용되지 않는 동시냉난방 운전모드만을 고려하였다.

각 운전모드에서 충전량 변화에 따른 시스템 성능을 측정하기 위하여 시스템을 항온항습 설비에 설치하고, 4대의 각 실내기 냉난방용량은 ANSI/AMCA 210⁽⁶⁾에 따라 제작된 풍량측정장치와 공기열량계법⁽⁷⁾으로 측정하였다. 실내기와 실외기의 열교환기 입·출구 공기의 건구 및 습구온도는 Pt 100Ω의 RTD를 사용하여 측정하였으며, 정밀도는 ±0.15℃이다. 시스템의 압축기 소비전력은 전력계로 측정하였으며, 정밀도는 측정값의 ±0.2%

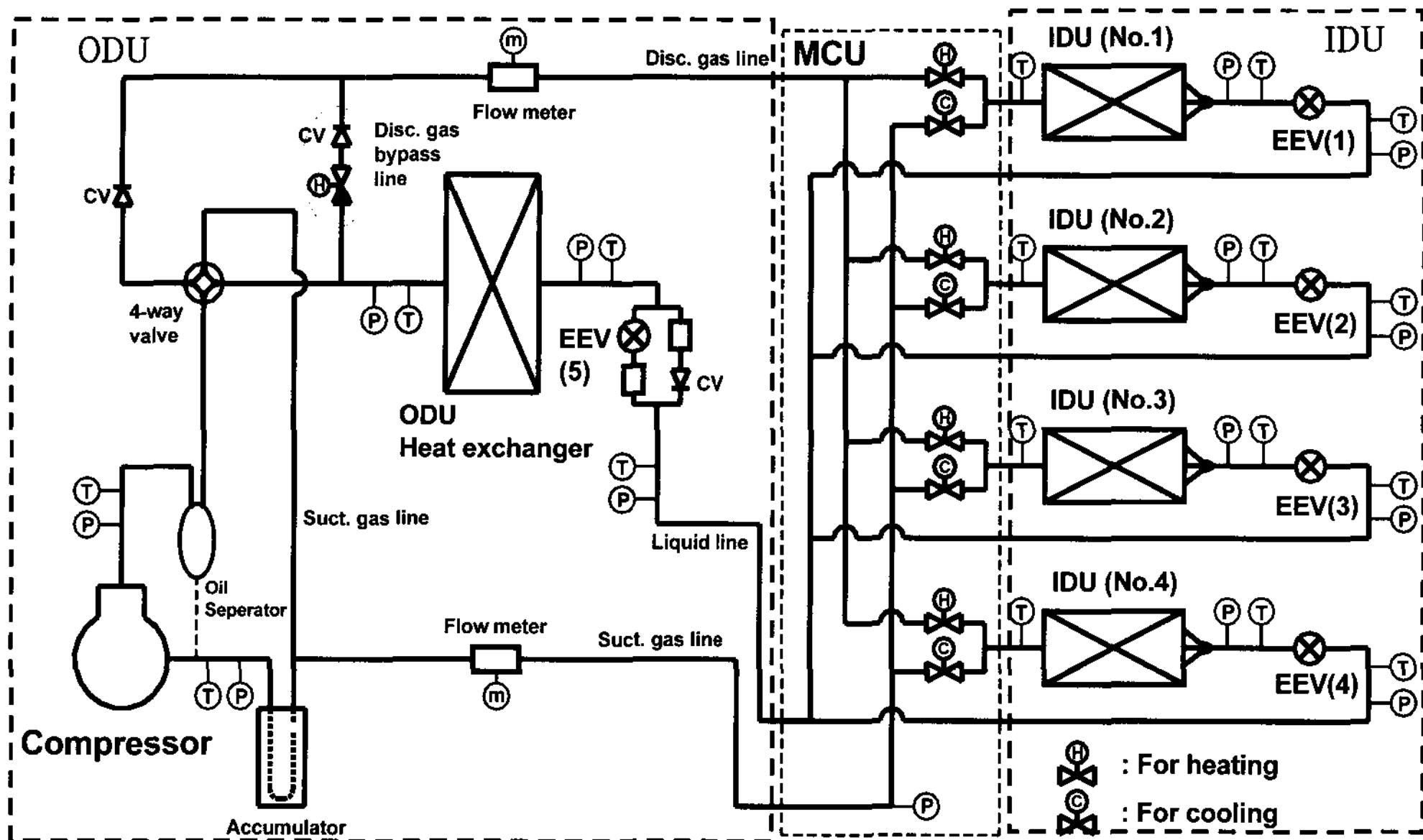


Fig. 1 Schematic diagram of a multi-heat pump with 3-piping system.

이다. 성능 분석을 위하여 시스템 주요 부위의 온도, 압력, 유량 등을 각각 T형 열전대, 압력계 및 질량유량계를 이용하여 측정하였다. 열전대와 압력계의 정확도는 각각 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 4.5\text{ kPa}$ 이며, 질량유량계의 정확도는 측정값의 $\pm 0.2\%$ 이다.

각 운전모드에서의 실내기와 실외기 입구의 온·습도 조건은 ARI⁽⁷⁾와 ISO 규격⁽⁸⁾을 기준으로 선정하였다. 냉방전용모드 운전시 각 실내기의 입구조건이 $27\text{ }^{\circ}\text{C DB}/19\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 이고, 실외기의 입구조건이 $35\text{ }^{\circ}\text{C DB}/24\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 일 때를 냉방 표준조건으로 선정하였다. 난방전용모드 운전시에 각 실내기가 $20\text{ }^{\circ}\text{C DB}/15\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 이고, 실외기의 입구조건이 $7\text{ }^{\circ}\text{C DB}/6\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 일 때를 난방 표준조건으로 선정하였다. 동시냉난방모드에서는 냉방용 실내기 유닛과 난방용 실내기 유닛의 입구조건은 각각 $27\text{ }^{\circ}\text{C DB}/19\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 와 $20\text{ }^{\circ}\text{C DB}/15\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 로 설정하였다.

최적 충전량은 최대의 COP를 나타내는 충전량으로 선정하였다. 냉방 표준조건에서 충전량 변화에 따라 시스템이 최대의 COP를 나타내는 충전량을 표준 최적 충전량으로 선정하였다.⁽⁹⁾ 표준 최적 충전량 선정 후에 시스템을 진공시킨 후 표준 충전량의 -28% 부터 $+42\%$ 까지 충전량을 변화시키며 각 모드에서 성능 실험을 수행하였다. 냉방전용모드에서는 실외부하를 $35\text{ }^{\circ}\text{C DB}/24\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 의 표준부하와 $43\text{ }^{\circ}\text{C DB}/26\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 의 과부하조건

으로 변화시켰으며, 난방모드에서는 실외부하를 $7\text{ }^{\circ}\text{C DB}/6\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 의 표준부하와 $16.7\text{ }^{\circ}\text{C DB}/13.6\text{ }^{\circ}\text{C WB}$ 의 부하조건으로 변화시켰다.^(7, 8)

각 시험조건에서 시스템의 온도, 압력, 유량, 소비전력을 측정하였다. 모든 데이터는 시스템이 안정된 후 2초 간격으로 70분간 측정 및 저장하였다. 냉방능력은 증발기 입출구의 2차유체의 온도 및 유량을 사용하여 계산하였으며, 실험의 신뢰성 확보를 위해 냉매측 열량과 비교하였다. 냉매측에서 산정한 용량과 공기측 용량은 모든 실험조건에 대하여 5% 이내에 서로 일치하였다. 각 실내기의 냉난방용량과 COP의 불확실성은 각각 3.1%와 3.2% 이내로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 냉방전용모드에서의 성능특성

Fig. 2 및 Fig. 3은 냉방전용모드에서 서로 다른 전자팽창밸브 개도에서 냉매 충전량 변화에 따른 시스템 COP와 냉매유량 변화를 각각 나타낸다. 모든 전자팽창밸브 개도에 대하여 저충전량 영역에서 충전량의 변화에 따른 COP 변화율이 과충전 영역에서의 변화율 보다 크게 나타났다. 저충전 영역에서는 충전량 감소에 따라 압축기 입구온도 상승으로 인하여 압축기 체적효율이

감소하고, 시스템의 냉매유량이 감소하여 냉방용량이 크게 감소하였다. 과충전 영역에서는 충전량 증가에 따라 고압측에 액상의 냉매량이 증가하여 응축압력과 증발압력이 증가한다. 이로 인해 실내기의 증발온도와 공기와의 온도차이가 감소하지만 냉매유량이 증가하여 충전량의 증가에 따른 용량 감소폭이 저충전량 영역에서보다 작으므로 냉매 충전량 증가에 따른 COP 감소율이 작게 나타났다.

냉방모드에서 충전량 변화에 따른 성능은 Houcek and Thedford⁽¹⁾와 Farzard and O'Neal⁽⁹⁾의 연구 결과와 동일한 경향을 나타냈다. 냉방전용모드에 대하여 외기온도 35 °C DB/24 °C WB와 실내온도 27 °C DB/19 °C WB의 표준조건에서 COP 기준 최적의 냉매 충전량은 3500 g에서 나타났으며, 본 연구에서는 3500 g을 표준 충전량으로 선정하고, 이

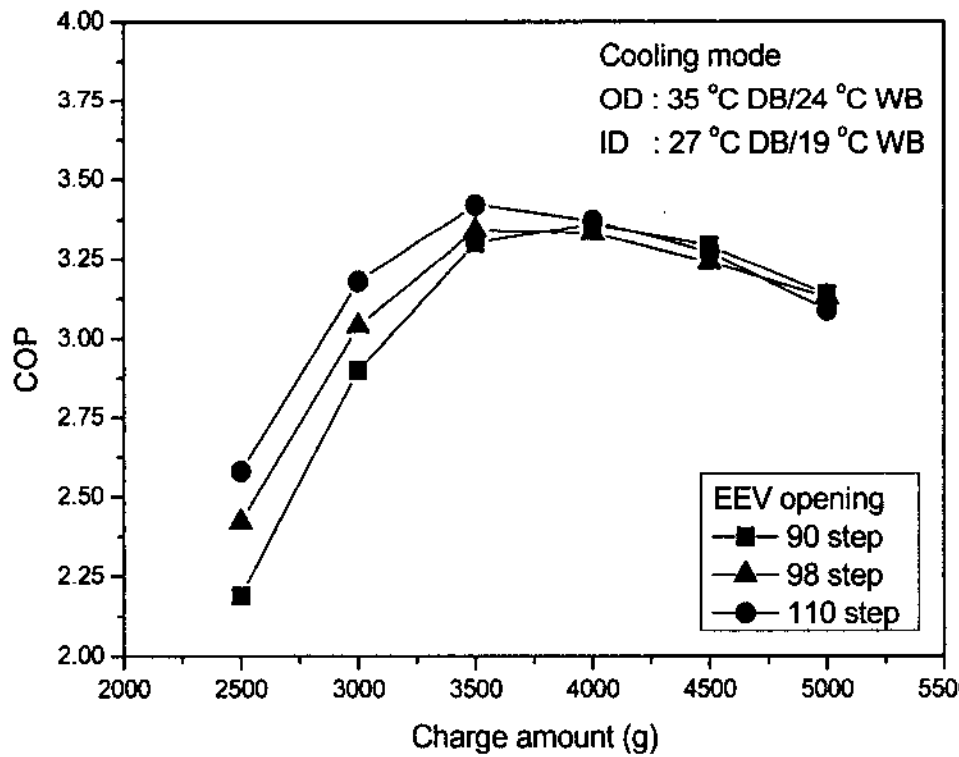


Fig. 2 COP according to charge amount in cooling mode.

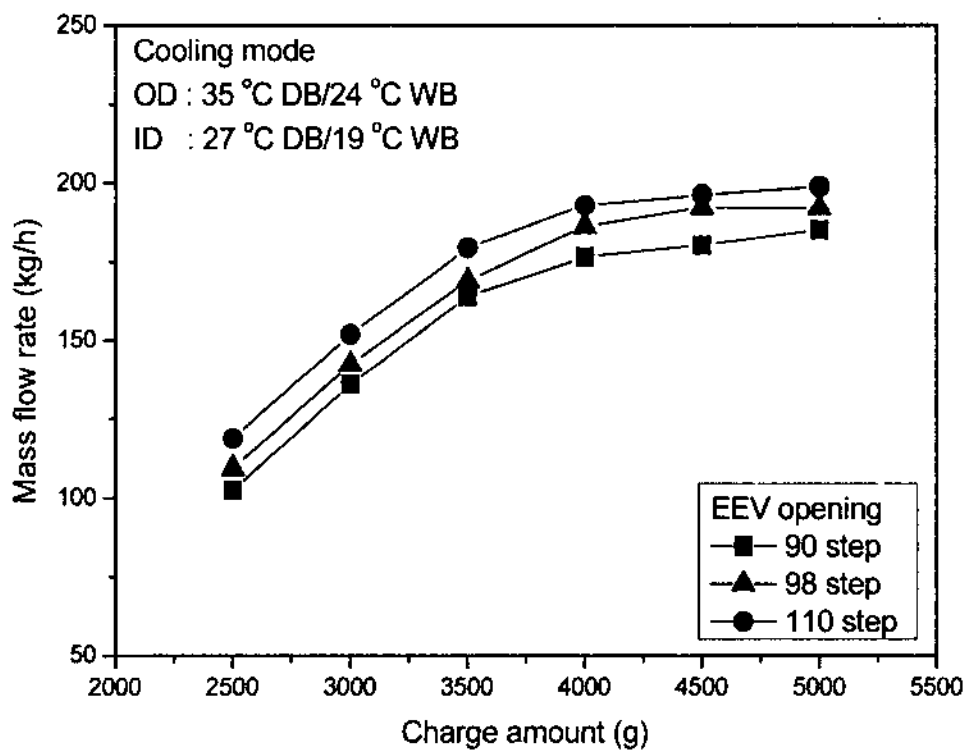


Fig. 3 Mass flow rate according to charge amount in cooling mode.

를 기준으로 충전량의 상대적 변화에 따른 운전 조건 및 운전모드 변화에 따른 성능특성을 분석하였다.

Fig. 4는 냉방모드에서 실외온도와 냉매 충전량 변화에 따른 시스템의 COP를 나타낸다. 모든 충전량에서 실외부하가 증가함에 따라 응축온도가 상승하고 이로 인해 응축압력 및 증발압력이 상승하지만 응축압력의 증가량이 크므로 압축기 입출구 압력차이가 증가하여 소비전력이 증가한다(Fig. 5 및 Fig. 6). 또한, 증발압력 증가로 인해 실내기에서 공기와 냉매와의 온도 차이가 감소하여 냉방용량이 감소하므로 실외부하 증가에 따라 COP가 급격히 감소하였다.

냉매 충전량이 최적치를 벗어나면, 모든 실외기 부하에 대하여 저충전 영역에서의 COP 감소폭이 과충전 영역에서의 감소폭보다 크게 나타났

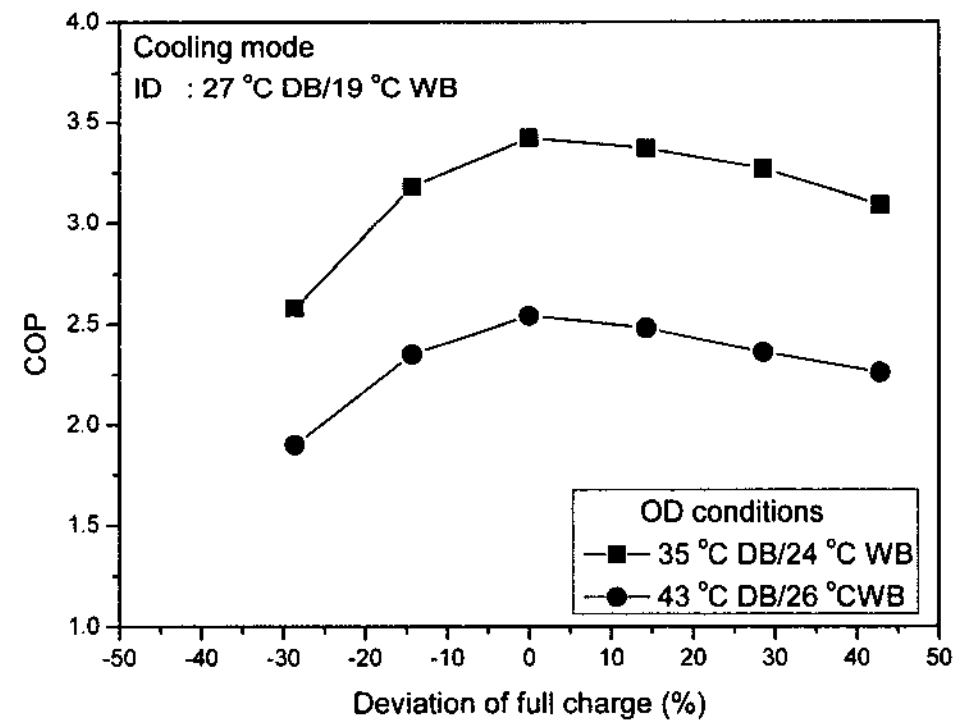


Fig. 4 COP according to charge amount at different OD conditions in cooling mode.

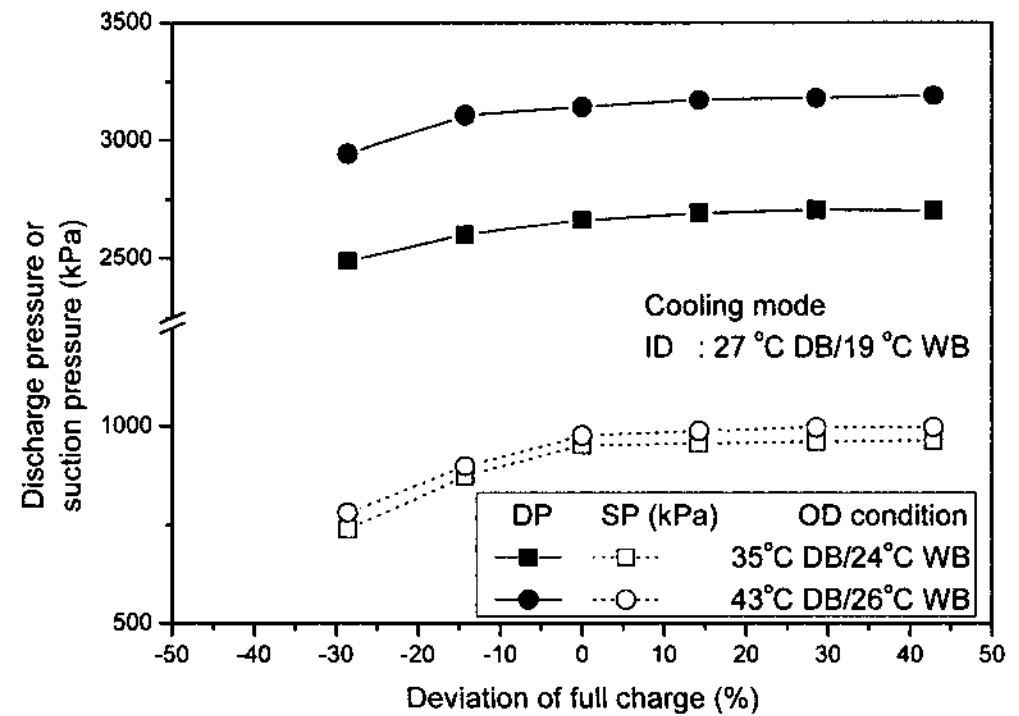


Fig. 5 Discharge and suction pressures according to charge amount at different OD conditions in cooling mode.

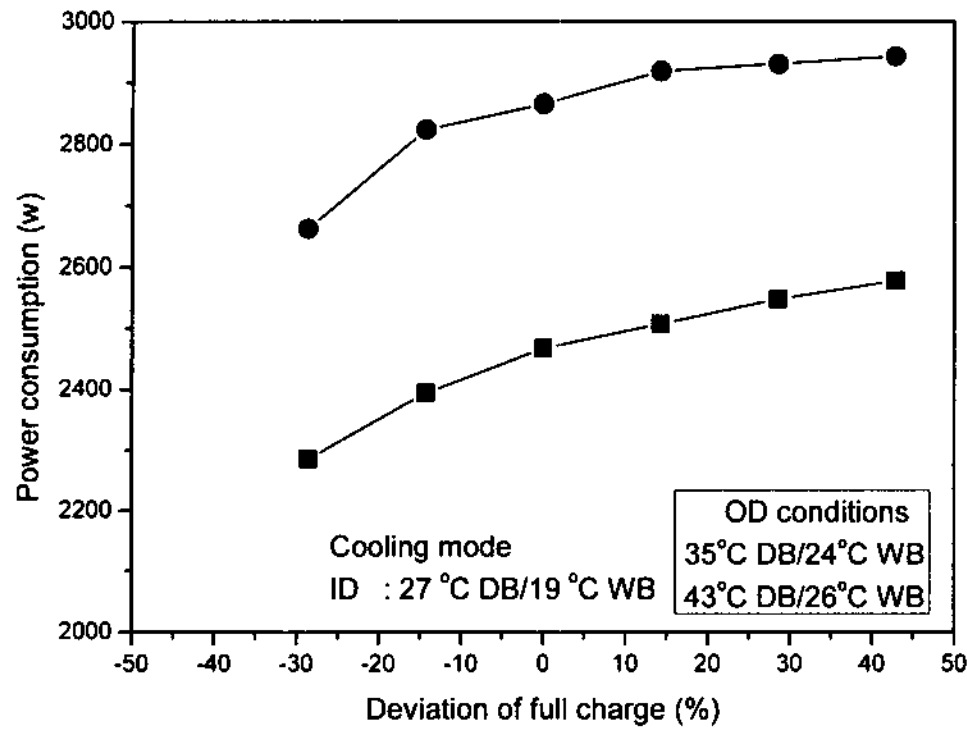


Fig. 6 Power consumption according to charge amount at different OD conditions in cooling mode.

다. 표준조건에서 표준 충전량 대비 -28% 또는 +28%의 냉매가 시스템에 충전된 경우 COP는 각각 24.6% 및 5.3%씩 감소하였다.

3.2 난방전용모드에서의 성능특성

Fig. 7은 난방전용모드에서 서로 다른 외기온도에 대한 충전량 변화에 따른 COP 변화를 나타낸다. 난방전용모드의 표준 충전량보다 냉매가 과충전된 영역에서의 COP 변화는 매우 작게 나타났다. 저충전량 영역에서는 충전량 변화에 따른 COP 변화율이 난방모드보다 크게 나타났으며, 과충전 영역에서는 충전량 변화에 따른 COP 변화율은 무시할 만하였다. 외기온도 7°C DB/6°C WB와 실내온도 20°C DB/15°C WB의 표준난방조건에서 표준 충전량 대비 +42%까지 냉매량이 과충

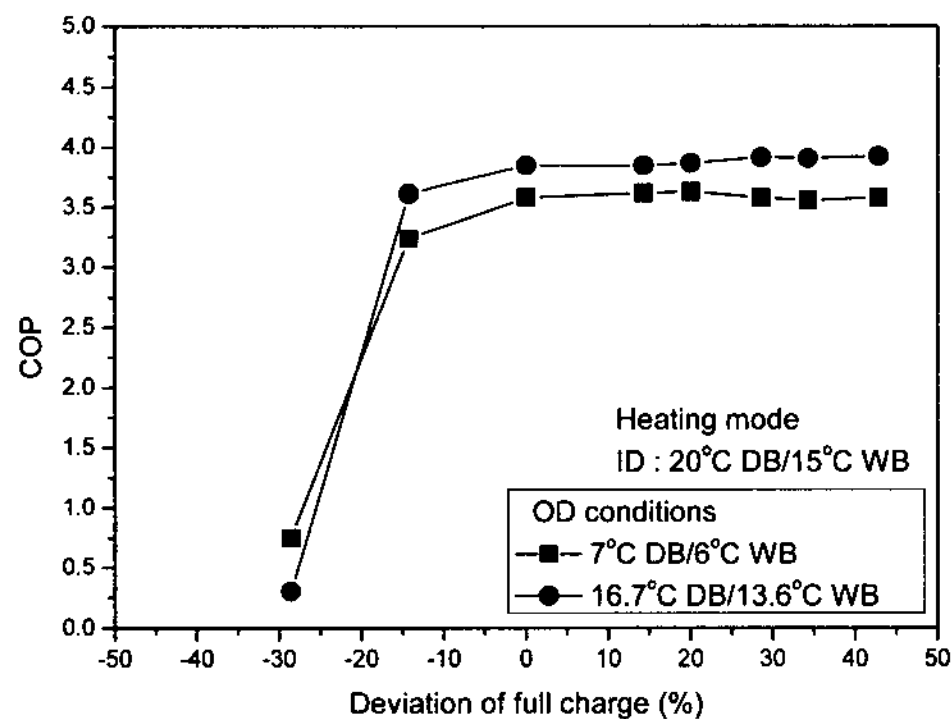


Fig. 7 COP with charge amount at different OD conditions in heating mode.

전된 경우 COP 변화율은 0에서 1.4% 이내의 미소한 변화를 나타내었다. 표준 난방조건에서 충전량이 -14%와 -28.5%로 변화될 때 COP는 각각 9.5%와 79.0%씩 감소하였다.

Fig. 8은 난방전용모드에서 충전량 변화에 따른 압축기 흡입압력과 토출압력의 변화를 나타낸다. COP 변화와 같이 과충전 영역에서 냉매 충전량 변화에 따른 흡입압력과 토출압력의 변화는 미소하였다. 난방전용모드에서는 압축기 토출구에서 운전모드 변환유닛으로의 토출가스 배관과 운전모드 변환유닛 내부 배관 및 실내기 모든 배관이 고압 배관으로서 난방전용모드에 비하여 고압 영역이 현저히 커서 고압측 액상배관의 길이가 증가하여 시스템이 액상의 냉매를 저장할 수 있는 공간이 크게 증가하여 과충전 영역에서 냉매 충전량 변화에 따라 시스템 변화가 크지 않은 것으로

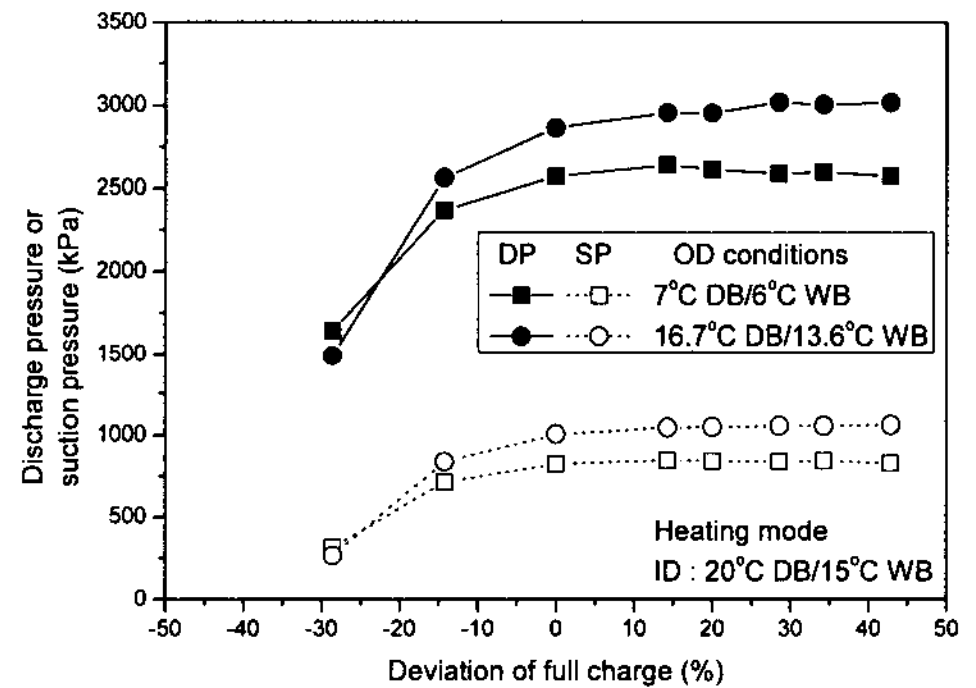


Fig. 8 Discharge and suction pressures with charge amount at different OD conditions in heating mode.

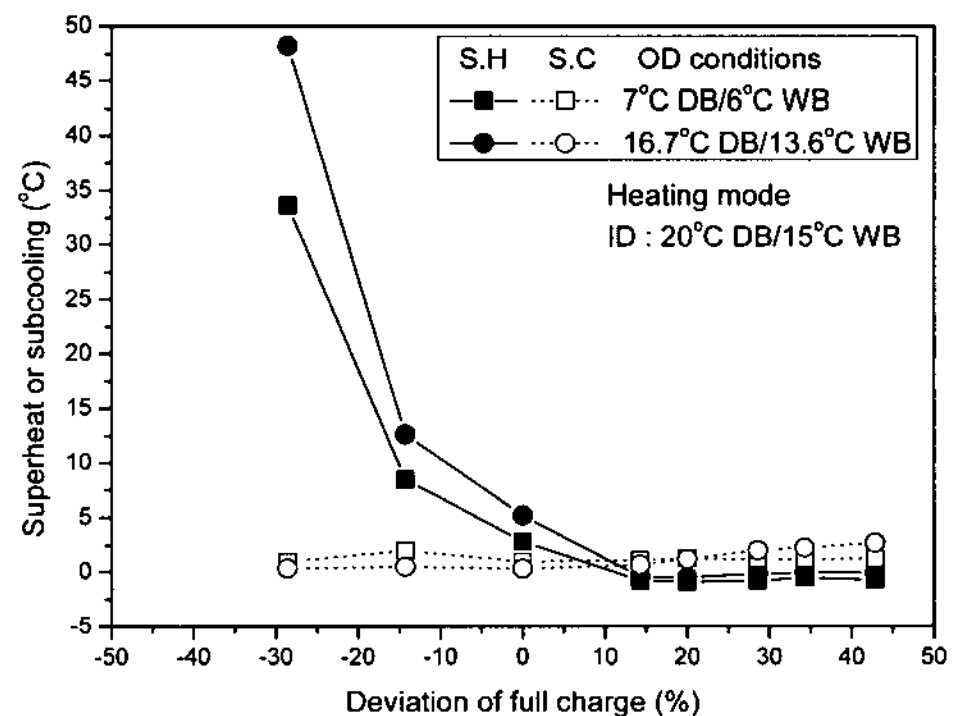


Fig. 9 Superheat and subcooling according to charge amount at different OD conditions in heating mode.

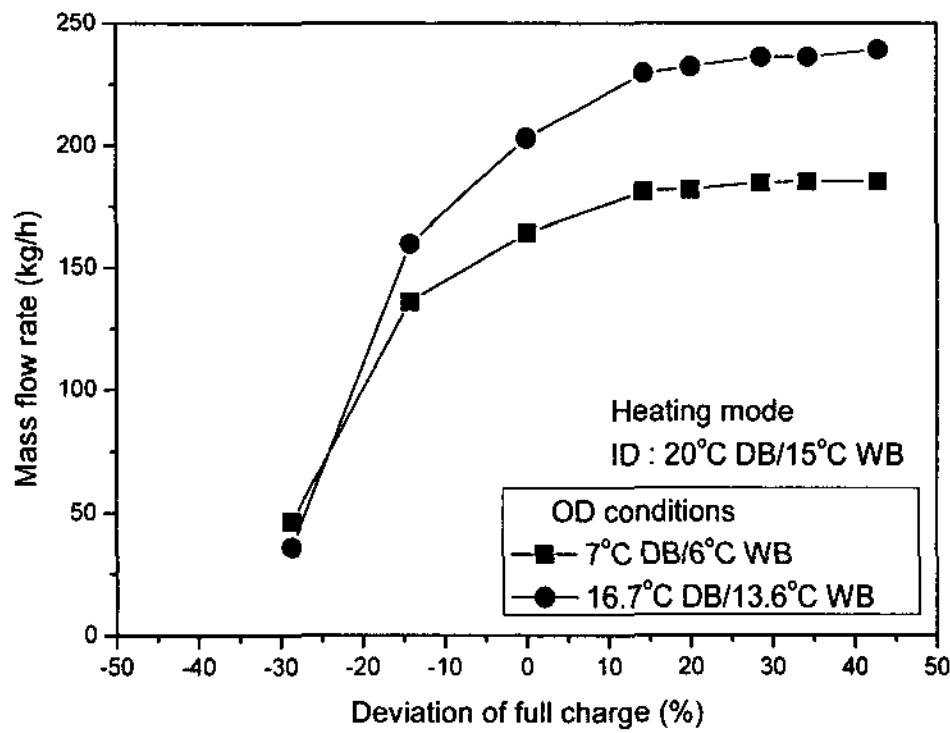


Fig. 10 Mass flow rate according to charge amount with different OD conditions in heating mode.

평가된다. 이로 인해 냉매 충전량이 증가함에 따라 냉매 순환유량의 증가로 과열도는 감소하였으나, 과냉도의 변화는 크지 않았다(Fig. 9). 약 +14%의 충전량 영역에서 과냉도와 과열도는 균형을 이루었다. 하지만, 저충전량 영역에서는 냉매량 부족으로 Fig. 10과 같이 시스템의 고압 및 저압의 감소로 냉매 순환유량이 크게 감소하고, 압축기 입구 과열도가 크게 증가하여 압축기 체적효율도 감소하며, 이로 인해 실내기의 난방용량이 크게 감소하여 COP 저하가 크게 일어났다.

외기온도의 증가에 따라 실내기의 응축압력 증가로 냉매유량이 증가하여 소비전력이 증가하지만, 난방용량의 증가폭이 커서 COP가 증가하였다. 또한, 외기온도가 변화되어도 충전량의 변화에 따른 성능은 유사한 경향을 나타냈다. 표준 난방부하조건에서 최대 COP를 나타낸 +14%의 충전량조건에서 외기온도가 7°C DB/6°C WB 조건에서 16.7°C DB/13.6°C WB로 변화될 때, COP는 3.62에서 3.85로 6.4% 증가하였다. 하지만, -28%의 저충전량 조건에서는 외기온도가 16.7°C DB/13.6°C WB인 경우의 COP는 7°C DB/6°C WB인 조건에 비하여 낮게 나타났는데, 이는 저충전량으로 인하여 압축기 흡입측의 과열도가 매우 커서 압축기 체적효율 감소로 인하여 냉매유량이 크게 감소하였기 때문이다.

3.3 동시냉난방모드에서의 성능특성

동시냉난방모드는 4대의 실내기 중에 2대의 실내기는 난방기로 2대의 실내기는 냉방기로 작동

한다. 동시냉난방모드는 다른 운전모드와 달리 실외기로 방출 또는 흡수되는 열을 실내기에 사용하기 때문에 열회수 운전이라고도 불리며, 기존 시스템에서 실외기를 통하여 버려지는 열을 회수하여 사용하기 때문에 성능계수가 매우 크다. 압축기를 냉방전용모드나 난방전용모드의 정격주파수인 3,500 rpm로 운전시켰을 경우, 상대적으로 전체 증발기와 응축기의 크기가 감소하므로 시스템에 이상 고압이 발생하여 정상적 운전이 불가능하여, 표준 충전량 조건에서 정격주파수보다 낮은 압축기 주파수 영역에서의 성능 실험을 통하여 냉방전용모드에서의 각 실내기 용량 이상의 실내기 용량을 갖는 압축기 회전수인 2100 rpm을 동시냉난방모드에서의 압축기 회전수로 선정하고, 이 압축기 회전수 조건에서 충전량 변화에 따른 성능 실험을 수행하였다.

Fig. 11은 동시냉난방모드에서의 충전량 변화에 따른 시스템 COP 변화를 나타낸다. 동시냉난방

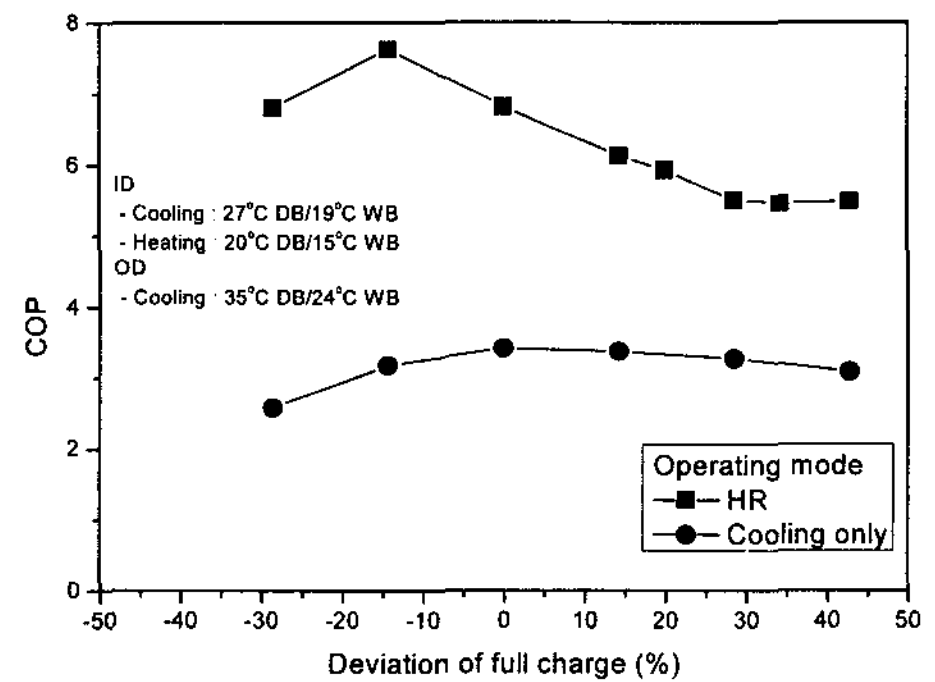


Fig. 11 COP according to charge amount in heat recovery mode.

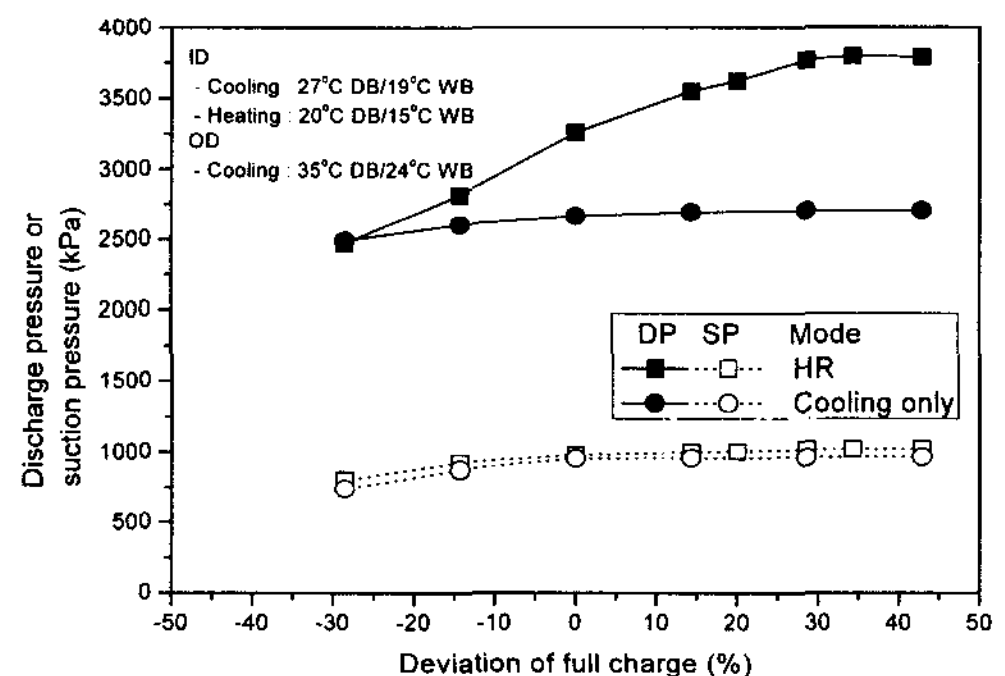


Fig. 12 Discharge and suction pressure according to charge amount in heat recovery mode.

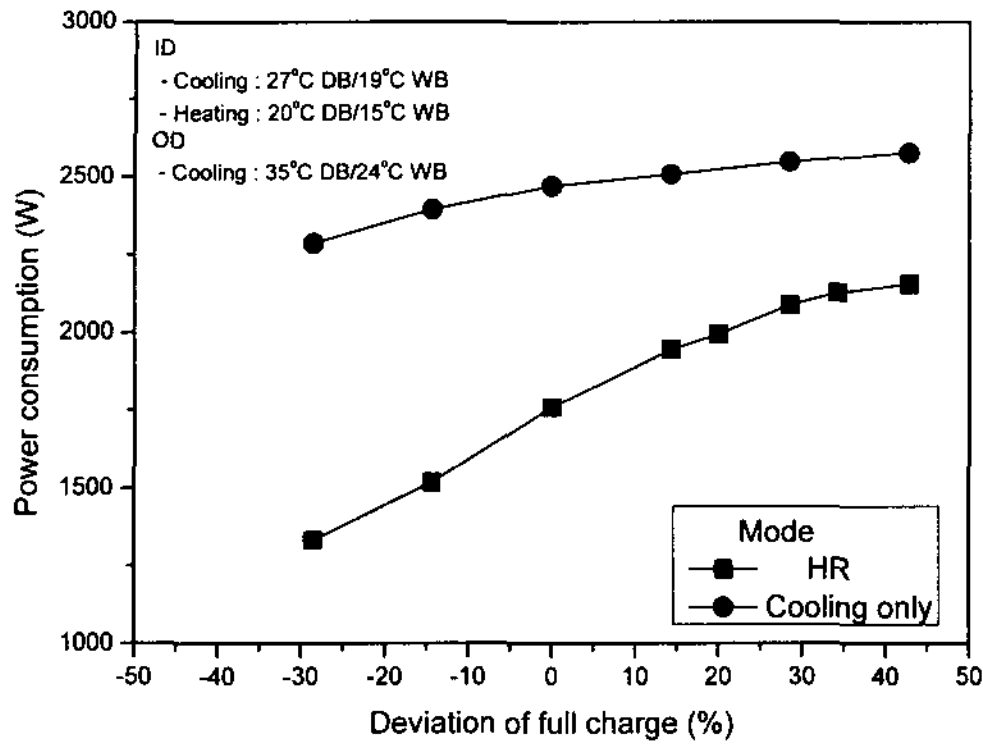


Fig. 13 Power consumption according to charge amount in heat recovery mode.

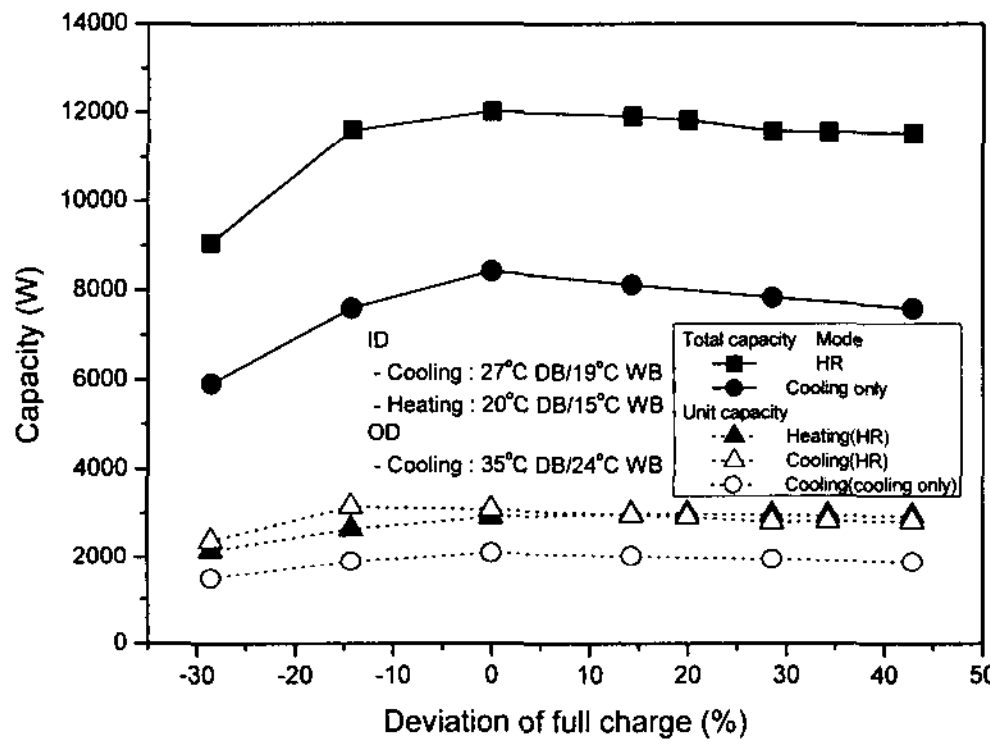


Fig. 14 Capacity according to charge amount in heat recovery mode.

모드에서는 표준 충전량 대비 -14%의 저충전량 영역에서 최대 COP를 나타냈다. 동일 충전량 영역에서 압축기 회전수가 낮지만 냉방전용모드 대비 응축압력이 매우 높게 나타났는데(Fig. 12), 이는 동일 사이즈의 실내기 2대씩이 각각 응축기와 증발기로 사용됨에 따라 상대적으로 응축기의 크기가 작아서 시스템 고압이 크게 증가하였기 때문이다. 압축기 회전수가 정격조건보다 작으며, 냉방전용모드와 달리 실외기에서 실외공기와 흡수 또는 방출하는 열량 없이 실내기에서 모두 회수하여 사용함에 따라 소비전력이 감소하고(Fig. 13), 전체 용량은 증가하여(Fig. 14) COP는 매우 높게 나타났으나, 최적 충전량은 표준 충전량보다 14% 적은 저충전 영역에서 나타났다. 압축기 회전수가 감소하였음에도 불구하고, 저충전 영역에서 최대 COP가 나타난 것은 실외기가 사용되지 않고, 실내기만으로 냉매가 순환하므로 상대적으로

시스템이 냉매를 저장할 수 있는 액상영역이 감소하고, 응축 열교환기의 크기가 작아서 시스템에서 요구되는 냉매유량이 감소하기 때문이다. 그러므로 동시냉난방 모드에서의 효율을 최대화하기 위해서는 운전모드 변화에 따라 냉매량의 효율적 저장 알고리즘이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

다양한 운전모드를 갖는 3관식 시스템 히트펌프의 냉매 충전량 변화에 따른 성능 특성을 규명하기 위하여 냉방전용, 난방전용 및 동시냉난방 모드에 대하여 표준 충전량 대비 -28%에서 +42%의 범위에서 충전량을 변화시키며 성능 실험을 실시하였다. 냉방전용모드에서는 냉매 충전량과 실외부하에 따라 성능이 변화되었으며, 저충전 영역에서의 용량 변동폭이 과충전 영역에서의 용량 변동폭보다 크게 나타났다. 난방전용모드에서는 과충전 영역에서 COP는 충전량 변화에 따라 변화폭이 크지 않았으나, 저충전 영역에서는 매우 크게 변화되어 시스템의 냉매량 진단 모드로 활용 가능할 것으로 분석되었다. 동시냉난방모드에서는 압축기 회전수를 감소시켰음에도 불구하고 실내기만을 응축기와 증발기로 사용하기 때문에 상대적으로 응축기의 크기가 작아서 시스템 고압이 크게 상승하였으며, -14%의 저충전량 영역에서 최대 COP를 나타냈다. 하지만, 동시냉난방모드에서는 냉방전용모드와 난방전용모드와 달리 실외기에서 방출 또는 흡수되는 열량을 실내기로 회수하여 사용되므로 매우 높은 COP를 나타냈다. 모든 운전모드에서 3관식 동시냉난방 시스템 히트펌프가 최대의 효율을 갖고 운전되기 위해서는 운전모드에 따른 냉매량의 효율적 저장 알고리즘 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발 사업(2006-E-CM11-P-05-3-010)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Houcek, J. and Thedford, M., 1984, A rese-