

동시냉난방 열펌프 시스템의 운전모드별 성능특성에 관한 수치적 연구

주 영 주, 정 현 준, 강 훈*, 최 중 민**, 이 무 연, 김 용 찬**

고려대학교 대학원 기계공학과, 고려대학교 기계공학과*, 한밭대학교 기계공학과**

Numerical Study on the Performance Characteristics of a Simultaneous Heating and Cooling Heat Pump System at each Operation Mode

Youngju Joo, Hyunjoon Jung, Hoon Kang*, Jongmin Choi**,
Mooyeon Lee, Yongchan Kim†

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

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

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

ABSTRACT: The cooling load in winter season is significant in many commercial buildings and hotels because of the usage of office equipments and 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 numerical study, a 4-room simultaneous heating and cooling heat pump system was modeled and its performance was calculated at each operating mode. Also, performance analysis was compared with experimental results.

Key words: Simultaneous heating and cooling(동시냉난방), Heat pump(열펌프), Cycle simulation(사이클 시뮬레이션), Heat recovery(열회수), Operation mode(운전모드)

기 호 설 명

하첨자

COP: 시스템 성능계수
CR : 압축비
m : 냉매질량유량 [kg/h]
W : 소비전력 [kW]
Q : 열전달률 [kW]
EEV : 전자팽창밸브

a : 평균
c : 냉방
h : 난방
t : 총합
map : 맵데이터

1. 서 론

최근 건축공학의 발전과 건축자재의 기술발전
에 따른 단열성능의 상승과 함께 사무자동화 기
기들의 보급이 증가됨에 따라, 냉방이 필요한 기
간이 장기화될 뿐만 아니라 겨울철에도 난방과

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-3290-5439

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

냉방이 동시에 요구되는 건물이 증가되고 있는 추세이다. 또한, 호텔 등과 같이 부하특성이 다양한 공간에서의 동시냉난방에 대한 요구도 꾸준히 증가되고 있다. 현재, 에너지절약 및 공간적인 측면에서의 이점으로 인해 멀티열펌프의 적용이 증가하고 있는 추세이지만, 기존의 멀티열펌프에서는 동시에 냉방과 난방운전이 병행될 수 없기 때문에, 호텔 또는 전산실과 같이 동시에 냉방과 난방이 요구되는 조건에서 소비자들의 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 동시냉난방 시스템의 개발이 필요한 실정이다.

현재까지의 연구동향을 살펴보면, 1대의 실외기와 다수의 실내기를 연결한 멀티 열펌프에 대한 성능예측 및 검증⁽¹⁾에 관한 연구와 R410A 냉매를 이용한 멀티에어컨의 시뮬레이션 프로그램 개발에 관한 연구⁽²⁾ 등이 있다. 이와 같이 멀티열펌프에서의 시스템 운전특성에 관한 연구에 집중되어 왔으며 동시냉난방 열펌프 시스템에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 냉방 및 난방이 동시에 운전되는 동시냉난방 열펌프의 각 운전모드별 기본적인 시뮬레이션 알고리즘을 제안하고자 한다. 시뮬레이션의 타당성 검증을 위하여 동시냉난방 열펌프의 냉방운전에서 냉방주체운전, 난방운전에서 난방주체 운전으로 변화함에 따른 성능변화를 수치적으로 나타내고, 실험데이터와 그 경향성을 비교하였다.

2. 열펌프 시스템 모델링

본 연구에서는 압축기, 실외 열교환기, 4개의 실내 열교환기 및 다수의 팽창장치로 구성된 R410A 냉매를 이용한 동시냉난방 열펌프에 대하여 사이클 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 1에 본 연구에서 모델링하고자 하는 4실형 동시냉난방 시스템을 나타내었다. 동시냉난방 열펌프 시스템은 기존의 멀티열펌프와는 달리 총 5가지 운전모드로 나눌 수 있다. 실내유닛이 냉방 또는 난방으로만 운전되는 냉방 및 난방전용모드, 동시냉난방 운전시 냉방운전 실내유닛수가 많은 냉방주체모드, 그 반대인 난방주체모드 그리고 난방운전 실내유닛과 냉방운전 실내유닛의 운전대수가

일치하거나 실외유닛으로의 냉매 흐름이 없는 전열회수모드로 나누어진다.

먼저 냉방주체운전모드는 압축기에서 저온냉매를 흡입하여, 고온 고압으로 토출하고, 사방밸브를 지나 실외열교환기를 통과하며, 주위로 방열한 후, 다른 한편으로는 고온 고압의 토출가스가 실내의 난방유닛으로 유입되어 방열한다. 2상상태의 냉매는 다수의 증발기를 통과하면서 2차유체로부터 열을 흡수한 뒤 압축기에 다시 유입되어 진다. 난방주체운전모드에서는 고온 고압의 토출가스가 다수의 실내열교환기를 통과하여 응축되고 실내의 냉방유닛과 실외열교환기로 유입되어 2차유체로부터 열을 흡수한 뒤 압축기에 다시 유입되어 진다. 마지막으로 전열회수 모드는 실내냉방유닛과 실내난방유닛으로 유입되어 사이클을 운전하게 된다. 실험에서의 압축기는 로터리 압축기를 이용하였으며, 실내 및 실외 열교환기는 공기열원 핀튜브형 열교환기로 구성하고, 팽창장치로 전자팽창밸브를 사용하였다.

2.1 압축기 모델링

본 연구에서는 압축기 제조사에서 제공하는 성능자료(map-data)를 이용하여, Rice and Fischer가 제안한 map-based 모델을 이용하였다. 압축기의 소비전력 및 냉매의 질량유량을 식(1)과 식(2)에 나타낸 바와 같이 응축온도(T_c)와 증발온도(T_e)의 2변수 이차방정식의 형태로 구성하였으며, 압축기 성능 데이터와 다른 과열도 조건에서는 Dabiri and Rice가 제안한 방법을 적용하여 압축기의 질량유량과 소비전력을 수정하였다.

$$W_{map}^c = \alpha_1 + \alpha_2 \times (T_e) + \alpha_3 \times T_c + \alpha_4 \times (T_e^2) + \alpha_5 \times (T_e \times T_c) + \alpha_6 \times (T_c^2) + \alpha_7 \times (T_e^3) + \alpha_8 \times (T_c \times T_e^2) + \alpha_9 \times (T_e \times T_c^2) + \alpha_{10} \times (T_c^3) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{map}^c = \beta_1 + \beta_2 \times (T_e) + \beta_3 \times T_c + \beta_4 \times (T_e^2) + \beta_5 \times (T_e \times T_c) + \beta_6 \times (T_c^2) + \beta_7 \times (T_e^3) + \beta_8 \times (T_c \times T_e^2) + \beta_9 \times (T_e \times T_c^2) + \beta_{10} \times (T_c^3) \quad (2)$$

2.2 실내 및 실외 열교환기 모델링

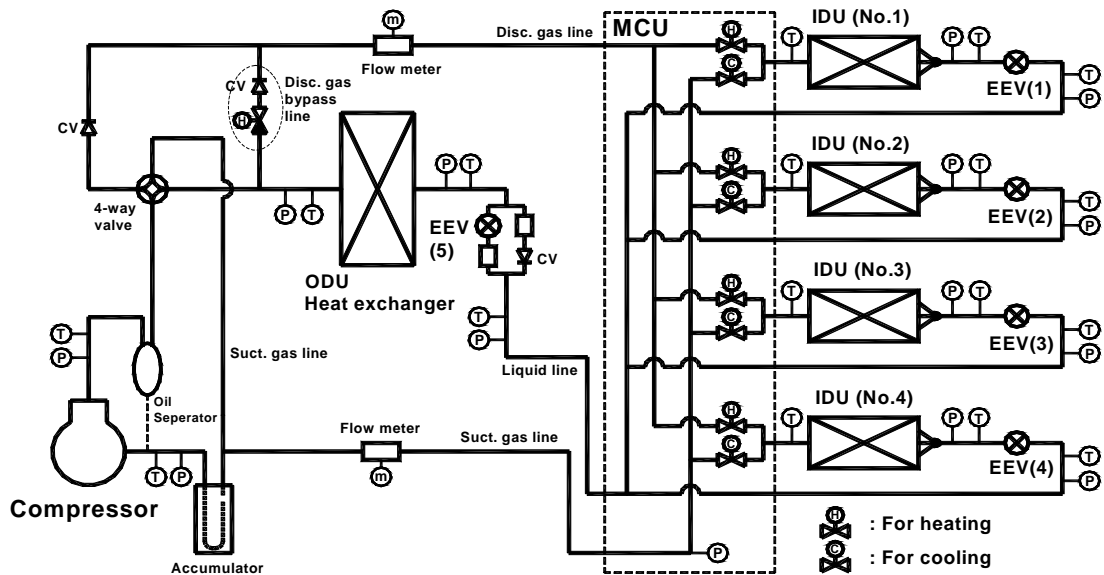


Fig. 1 Modeling of simultaneous cooling and heating system.

본 연구에서는 실내 및 실외 유닛의 열교환기로 핀튜브형 열교환기를 사용하였으며, 관순법을 적용하여 열교환기 전체를 n개의 구간으로 나누어 한 구간에서 입구조건을 입력으로 하여 그 구간에서 열교환 관계식을 풀어 출구조건을 구한다. 계산된 출구조건을 다음 구간의 입력조건으로 하여 동일한 방법으로 전체 열교환기의 열교환량 및 출구조건을 구한다.

냉매측 열전달계수는 단상과 이상영역으로 구분하여 상관관계식을 적용하였다. 응축기와 증발기의 단상영역에 대해서는 Dittus-Boelter 상관관계식을 사용하였다. 냉매의 이상영역에 대해서는 Gungor and Winterton의 상관관계식을 사용하였다. 열교환 이차유체로는 공기로서 j-factor를 이용한 상관식을 이용하여 공기측 열전달계수를 구하였다.

2.2 팽창장치 모델링

본 연구에서는 팽창장치로 전자팽창장치를 사용하였으며, 유량예측은 Park et al.⁽³⁾ 이 개발한 R410A 냉매를 적용한 경험적 전자팽창밸브 유량모델을 사용하였다. 본 모델을 변형하여 입구압력과 질량유량을 입력으로 출구압력을 계산하였다. 유량모델의 오차율은 $\pm 15\%$ 이내이다.

2.3 사이클 시뮬레이션

본 열펌프의 시뮬레이션 모델은 Domanski의 모델과 ORNL모델을 기초로 구성하였다. 시스템이 각 운전조건에서 최적의 냉매가 충전되었다는 가정 하에 과열도를 고정하고 성능해석이 수행되어졌으며, 시뮬레이션에서는 엔탈피 평형과 압력 평형만을 고려하였다. Fig.3과 Fig. 4는 본 연구에서 적용한 냉방주체 및 난방주체 모드에서의 수치모델 순서도를 나타내고 있다. 냉방 및 난방 전용 사이클은 Song et al.⁽⁴⁾의 멀티열펌프의 알고리즘에 기초하여 계산되었으며, 전열회수 운전모드의 알고리즘은 난방전용운전모드를 기초로 구성하였다.

냉방주체운전모드 알고리즘은 압축기에서 토출된 질량유량이 실외유닛과 실내 난방유닛으로 분배 된다. 이를 바이패스 비(bypass ratio)를 변수로 이용하여, 초기 질량유량을 가정하고 두 열교환기의 출구압력을 비교하여 분배된 질량유량을 가감하여 결정하였다. 또한 각 냉방실내유닛으로의 질량분배 결정은 같은 양의 질량을 가정하여 각 실내기로 분배하고, EEV와 증발기를 계산한 출구압력을 비교하여 분배되는 냉매의 질량유량을 결정하였다. 계산이 완료된 증발기 출구측의 질량유량과 엔탈피는 초기 가정한 압축기 입구측의 질량유량과 엔탈피를 비교하여 시스템의 T_c ,

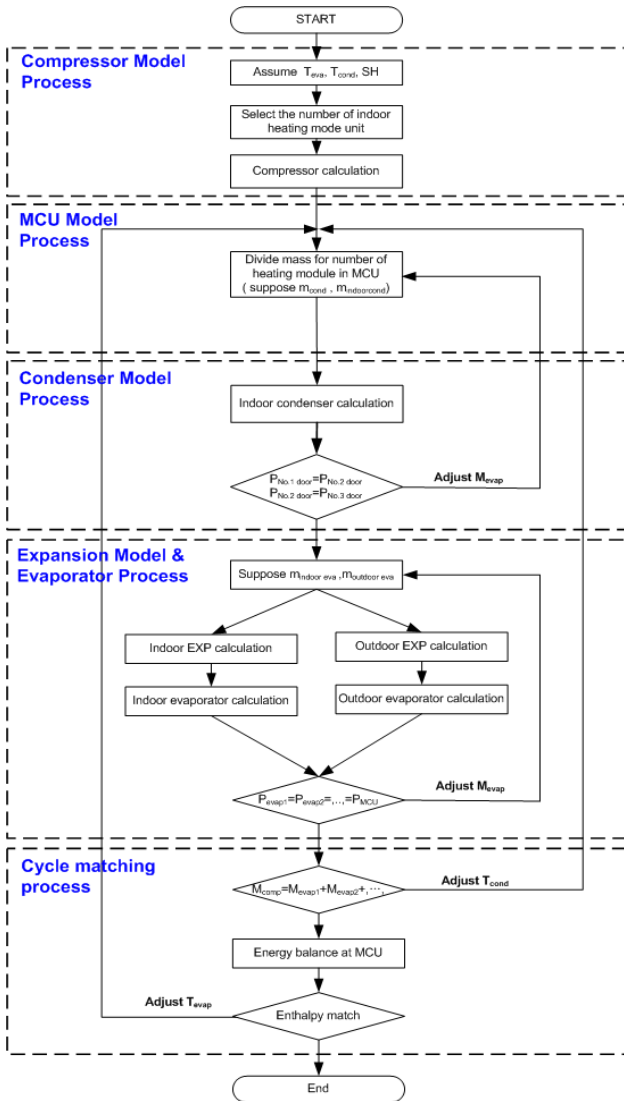


Fig. 2 Flow chart for cooling-main operation mode.

T_e 를 변화시켜 시뮬레이션 매칭을 수행하였다.

난방주체모드에서의 알고리즘은 각 실내난방유닛간의 질량분배를 가정하고, 압력평형을 통해 실내측 질량유량을 계산하였다. 실내냉방유닛과 실외유닛의 분배는 냉방주체 알고리즘과 같이 바이패스 비(bypass ratio)변수를 이용하여, 질량유량을 가감하여 결정하였다. 전체적인 사이클 시뮬레이션은 실내 증발기 출구에서의 냉매과열도 및 증발기와 응축기의 포화온도를 가정하여 얻은 압축기 입구압력과 토출압력을 이용하여 압축기의 성능을 계산하였다. 압축기의 성능계산 결과를 이용하여, 압축기의 토출 냉매유량 및 상태량을 구한 뒤에 실외 및 실내 응축기 및 전자팽창

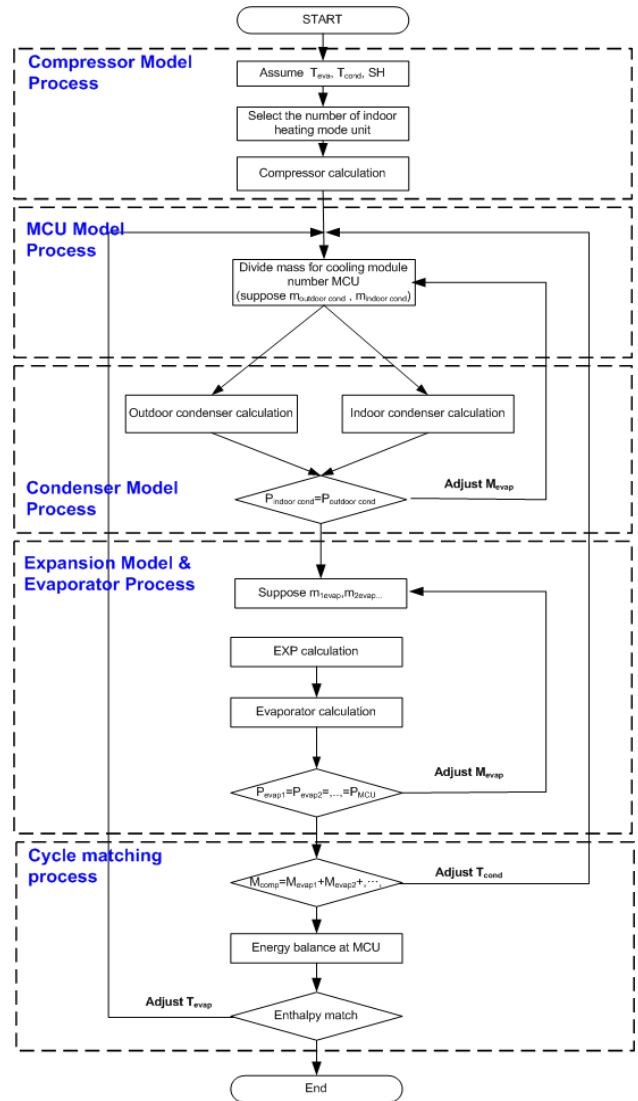


Fig. 3 Flow chart for heating-main operation mode.

밸브에 대한 성능을 계산하였다.

전열회수모드의 알고리즘은 난방주체 알고리즘을 기본으로 하여 각 2개의 실내난방유닛과 실내냉방유닛을 냉방주체, 난방주체운전시의 실내기간 분배 알고리즘으로 고려하여 계산하였다.

시뮬레이션의 성능 계산은 5가지의 모드에 대해서 수행되었으며 실내 및 실외측의 2차유체인 공기측 조건을 Table 1에 나타내었다. 모든 운전 모드에서의 시스템의 성능은 식(3)과 같이 나타내었다.

$$COP = \frac{Q_{total\ cooling} + Q_{total\ heating}}{W} \quad (3)$$

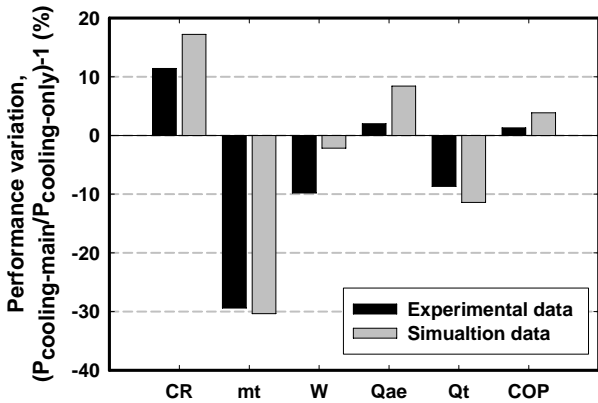


Fig. 4 Comparison of the operation characteristics between cooling-only and cooling-main mode.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 냉방운전 및 냉방주체운전 모드에서의 성능특성

사이클 시뮬레이션을 통하여 냉방주체운전과 냉방전용운전모드에서의 데이터를 비교하였다. 운전모드의 변화에 따라 공기측 풍량 및 온도조건은 동일하며, 동일한 압축기 맵데이터와 실외 및 실외 열교환기 형상 및 사양을 이용하였다. 운전모드의 변화에 따른 EEV개도는 알맞은 사이클 매칭을 위해 적절한 EEV개도를 선정하였다.

냉방운전 모드와 냉방주체운전 모드의 성능 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 냉방주체운전에서 압축기에서 토출된 냉매는 실내와 실외 응축기 양단에 바이패스 비(bypass ratio)변수를 이용하여 분배하였으며, 압력평형에 계산에 의해 약 16%의 냉매유량이 결정되었다. 실내열교환기 대수가 4대에서 3대로 줄어들면서, 실내유닛으로 분배되는 질량유량이 늘어나고 EEV 출구압력이 감소하지만, 증발기 출구엔탈피와 압축기 입구의 질량유량 매칭을 통해 응축압력이 감소하였다. 결국 전체적으로 시스템의 압력은 감소하게 되며, 압축기 일 또한 증발압력의 감소로 인해 감소하였다. 냉방주체모드에서 평균 냉방능력은 감소하며 이에 비해 실내기의 평균열량이 감소하였지만 압축기일의 감소로 COP는 증가함을 보이며 실험데이터와 유사한 수준에서 사이클의 경향을 보였

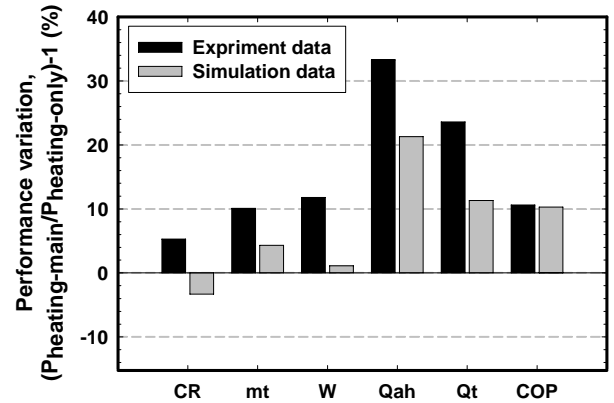


Fig. 5 Comparison of the operation characteristics between heating-only and heating-main mode.

다.

3.2 난방운전 및 난방주체운전 모드에서의 성능특성

Fig. 5는 난방전용 운전모드 사이클 시뮬레이션을 통하여, 난방전용운전에서 난방주체운전으로 변화하는 시스템 주요변수의 변화를 비교하였다. 난방운전모드에서 난방주체운전모드로 변화는 난방운전 실내유닛의 대수가 4대에서 3대로 감소함에 따라 각 실내난방유닛으로 유입되는 질량유량이 먼저 증가하였으며, 이에 따라 각 실내기에서의 압력 강하량이 감소하였고, 초기 응축기 출구의 압력과 엔탈피가 증가하면서, EEV 출구압력이 감소한다. 증발기 출구의 엔탈피가 압축기 입구 엔탈피보다 크게 나타나지만, 질량 및 엔탈피 매칭을 통해

Table 1 Simulation conditions for each operation mode

Operating mode	IDU for cooling	IDU for heating	ODU
Cooling-only	27.0°C / 47.0% RH	-	35.0°C / 40.4% RH
Cooling-main	27.0°C / 47.0% RH	20.0°C / 59.0% RH	35.0°C / 40.4% RH
Entire-heat recovery	27.0°C / 47.0% RH	20.0°C / 59.0% RH	-
Heating-only	27.0°C / 47.0% RH	20.0°C / 59.0% RH	7.0°C / 86.9% RH
Heating-main	-	20.0°C / 59.0% RH	7.0°C / 86.9% RH

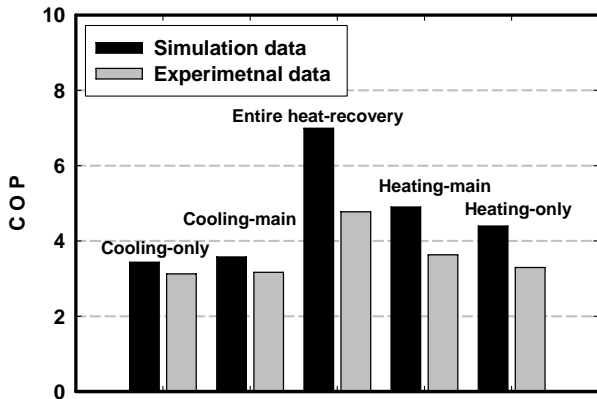


Fig. 6 COP variation of each operation mode.

압축기 맵데이터의 응축온도의 상승으로 질량유량이 감소함을 보였다. 실내유닛 한 대가 증발기 역할을 하면서 증발기 총 열량은 증가하였다. 난방주체운전시 실내증발기와 실외증발기로의 분배되는 바이패스 비(bypass ratio)는 압력평형 매칭을 통하여 21.42%의 값을 나타냈다.

3.3 전열회수운전에서의 성능특성

전열회수 운전의 사이클 알고리즘은 기본적으로 난방전용운전 시뮬레이션과 유사하나, 질량분배를 위한 각 실내유닛간의 압력평형을 위한 알고리즘이 적용되었다. 동시냉난방열펌프의 각 모드별 전열회수 능력을 비교하기 위해 Fig. 6에 각 운전모드별 COP를 나타내었다. 전열회수 모드는 실내열교환기만으로 사이클이 형성되므로 열교환 효과는 모두 출력으로 나타나므로 COP는 크게 나타나며 전열회수에 의한 효과가 크게 향상됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 정상상태 사이클 시뮬레이션을 통하여, 4실형 동시냉난방 열펌프 시스템의 운전모드별 사이클 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 타당성을 위해서 각 운전모드에서의 주요변수의 변화를 실험값과 비교하였다.

동시냉난방 열펌프의 냉방주체, 냉방전용, 전열회수, 난방주체, 난방전용 운전모드에서의 수치적 모사가 가능하였다. 냉방전용과 냉방주체, 난방전용과 난방주체

모드와 난방주체 모드로의 시스템의 주요변수의 변화를 계산과각 운전모드별 시스템의 전열회수 효과를 나타내기 위한 COP 변화경향이 실험과 일치하였다.

향후 실험을 통해 가능하지 못했던 실내 난방 유닛으로의 바이패스량 변화와 실내기의 개별적 2차측 유체의 변화에 따른 성능특성 또한 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발 사업(2006-E-CM11-P05-0-000)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Han D.Y., Chung M.Y., 2000, Multi type heat pump system computer simulation and experimental verification, SAREK, Vol. 12, No. 1, pp.12~19.
2. Kim Y.J., Park I.S., Kim H.H., Youn B., Kil S.H., 2002, Development of a cycle simulation program for multi-airconditioning systems using R410A., 산학기술성공학회논문집, Vol. 3, No. 3, pp.210~215.
3. Park C., Cho H, Lee Y., Kim Y., 2007, Mass flow characteristics and empirical modeling of R22 and R410A flowing through electronic expansion valves, International Journal of Refrigeration, doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.03.011
4. Song J.S., 2007, Simulation on the performance of a multi-type heat-pump system with a variation of pipe length and height, M.S Thesis, Korea university.
5. Joo Y.J., Kang H., Lee S., Chung H.J., Kim Y., Choi J.M., 2007, Experimental study on the performance characteristics of a simultaneous heating and cooling heat pump system at each operation mode, Proceedings of the SAREK, pp.109~114.