

고성능 히트펌프 해석모델 개발 연구

임상식¹, 김기범^{1*}, 박성영²

¹충북대학교 기계공학부, ²공주대학교 공과대학 생산기술연구소

Development of Analysis Model for High-Performance Heat Pump

Sang-Sik Yim¹, Ki-Bum Kim^{1*} and Sung-Young Park²

¹Division of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

²Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약 히트 펌프는 지열이나 태양열 등의 신재생 에너지를 이용하거나 기타 폐열을 재활용하여 기존의 전기 히팅 난방 시스템들보다 에너지 소비율을 낮출 수 있다는 장점으로 인해 그린 에너지 시스템으로써 주목을 받아 왔다. 고효율 히트펌프 시스템 설계를 위한 연구는 오랫동안 지속되어 왔지만, 각각의 구성요소가 유기적이며, 변화에 유연한 해석모델은 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 공기 열 원식 히트 펌프를 AMESim Software를 이용해 구성하였다. 독자적으로 개발한 스크롤 압축기 해석 모델을 히트펌프 시스템에 조합함으로써 효율 향상 방안을 모색하였으며, 실험 데이터를 이용하여 개발한 해석모델을 검증하였다. 실험 데이터와 개발한 해석 모델을 이용하여 예측된 데이터를 비교한 결과 최대 오차가 10% 이내로 두 데이터가 잘 일치하였다. 본 연구에서 개발한 히트펌프 해석모델은 향후 시제품을 개발하고 효율 향상을 위한 연구 등에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

Abstract Heat pumps have attracted considerable attention as a green energy system because they use renewable energy, such as geothermal, solar energy and waste heat, and can have a low electricity consumption rate compared to other conventional electric heating system. Many studies of high efficient heat pump system design was performed previously, but it is not easy to find any an analytical model that consists of components (e.g. compressor, heat exchangers, and expansion valve), not only having an interrelation and interconnection each other but also being flexible to any change in geometry and operating parameters. In this study, a computational model was developed for a heat pump with warm air as a heat source using the one-dimensional modeling software, AMESim. In combination with an independently-developed analytical model for a scroll compressor, the heat pump model can simulate the physical characteristics and actual behavior of the heat pump precisely. In addition, the reliability of the model was improved by verifying the simulation results using experimental data. The simulation data fell into the 10% error range compared with the experimental data. The heat pump model can be used for system optimization studies of product development and applied to other applications in a range of industrial field.

Key Words : AMESim Software, Heat Pump, Scroll Compressor

1. 서론

인류가 진보함에 따라 쾌적함에 대한 요구는 끊임없이 이루어지고 있다. 특히 냉·공조 시스템은 주거 및 근로환

경에 필수 요소가 되었고, 이는 쾌적한 주거 환경과 작업 능률에 지대한 영향을 미친다. 하지만 화 석 에너지의 고 갈 및 급등하는 에너지 수요와 환경규제 등의 문제로 인 해 냉·공조 시스템의 고효율 및 고성능화에 대한 요구가

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합연구사업의 지원으로 수행되었음 (과제번호 B551179-11-02-00).

*Corresponding Author : Kibum Kim (Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

Received August 30, 2013

Revised (1st October 11, 2013, 2nd October 29, 2013)

Accepted December 5, 2013

지속적으로 대두되고 있으며, 성능 향상을 위한 연구 또한 활발히 진행 중이다.

냉·공조 시스템 중 최근 가장 주목 받고 있는 것이 히트펌프 시스템이다. 기존의 냉·공조 시스템에 비해 에너지 효율과 기기 활용도가 높아 세계적으로 가장 유망한 에너지 절약 기술로 각광받고 있다[1]. 또한, 지열 및 태양열과 기타 폐열 등을 열원으로 이용하여, 화석 연료 사용 및 이산화탄소 배출 저감 등 친환경적 요소를 많이 가지고 있는 점이 히트펌프의 장점이다[2].

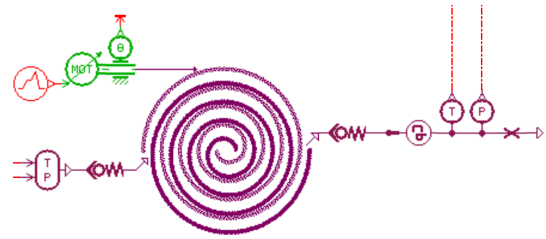
히트 펌프의 거동을 이해하고 물리적, 열역학적 특성을 정확히 구현하기 위하여 이미 많은 연구팀들이 다양한 해석 모델을 개발 하였다[3-5]. 그러나, 시스템 구성 요소의 기하학적 변화에 유연하며 다양한 상태변화에 민감하게 반응하는 모델은 아직도 전무후무한 실정이다. 현재 EES 등의 많은 소프트웨어를 통해 히트펌프 시스템을 연구하지만, 구성 요소의 변화에 유연하며 다양한 변화에 민감한 모델의 개발은 부족하다. 따라서 본 연구에서는 공기 열원식 히트펌프를 해석할 수 있는 모델을 AMESim software를 이용하여 구현하였으며, 이는 상용 1차원 모델링 프로그램으로 사용자가 모델링을 단시간에 쉽게 이해하고, 특수한 적용분야에 맞게 수정하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

히트펌프의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나가 압축기이다. 압축기는 전체 시스템의 80%가량의 동력을 소모한다. 따라서 압축기의 선택 또한 중요한 인자가 된다[6]. 이번 연구에서는 AMESim 모델링 프로그램을 이용하여 독자적으로 개발한 스크롤 압축기 해석 모델을 포함한 고성능 히트펌프 시스템 해석 모델을 구현하고, 모델의 신뢰성을 실험 결과를 이용하여 검증하였다. 본 연구에서 개발된 해석 모델은 향후 고성능 히트펌프 개발 및 시스템 최적화 연구 시 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 모델링

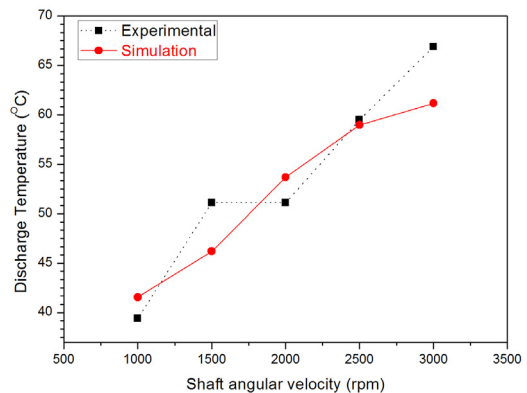
2.1 스크롤 압축기

압축기는 크게 속도형과 용적형으로 나뉜다. 일반적으로 냉·공조에 사용되는 압축기는 용적형 압축기이며, 회전식과 왕복동식 압축기로 다시 구분된다. 회전식 압축기인 스크롤 압축기는 왕복동식 압축기에 비해 기계효율이 높으며, 소음 및 진동이 적다. 또한 구조가 간단하여 소형 및 경량화에 유리한 장점을 지니고 있다. 따라서 고성능 히트펌프 구성을 위해 이번 연구에서는 Fig. 1과 같이 독자적으로 개발한 스크롤 압축기 모델을 이용하였다[7].

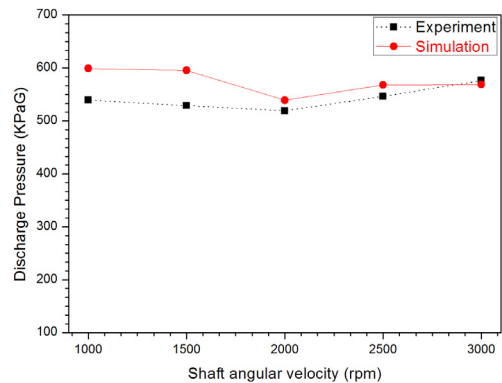


[Fig. 1] A Computational model for a Scroll compressor

Fig. 2와 3은 스크롤 압축기 해석모델을 이용해 실험 결과와 해석 결과를 비교한 선도이다. 실선이 해석 결과이며, 점선이 실험 결과이다. 해석모델은 2000rpm을 기준으로 최적화를 하였으며, 나머지는 rpm만을 변수로 취급하여 얻은 결과이다. 압축기 데이터는 압축기만을 독립적으로 실험해 얻은 데이터가 아니며, 냉동사이클을 구성하여 그 중 압축기 데이터만을 추출한 것이다. 따라서 토출 압력이 축의 회전속도에 따라 증가하지 않는 경향을 보인다.



[Fig. 2] Discharge temperature for various angular velocity of the shaft

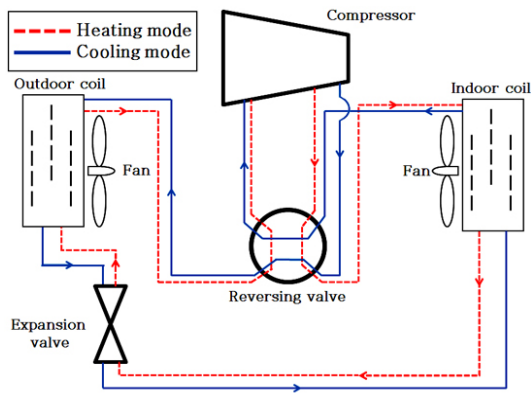


[Fig. 3] Discharge pressure for various angular velocity of the shaft

일반적으로 축의 회전속도가 증가하면 토출압력도 증가한다. 하지만 실험 시 압축기로 흡입되는 압력이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 흡입 압력이 감소되어 회전속도가 증가하여도 토출압력의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않는다.

2.2 히트 펌프

히트펌프 시스템은 냉방과 난방모드를 병합하여 사용할 수 있는 하나의 기계 시스템이다. Fig. 4는 히트펌프 사이클의 개략도이다.

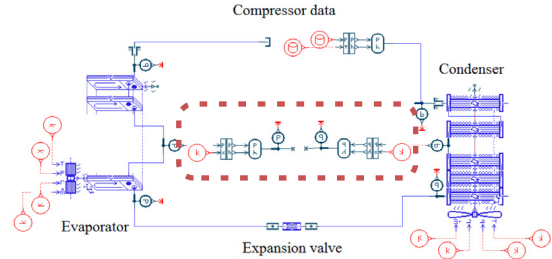


[Fig. 4] Schematic diagram of a Heat pump system

냉방과 난방을 하나의 기계장치로 작동시키기 위한 필수 구성 요소는 압축기, 응축기, 증발기, 팽창밸브이다. 응축기와 증발기는 물리적으로 고찰하면 단순한 열 교환 장치이며, 흡열과정을 수행하는 것을 증발기, 방열 과정을 수행하는 것을 응축기로 구분한다. 따라서 실내에 흡열 과정의 열교환기가 위치하면 냉방모드가 되며, 방열 과정의 열교환기가 위치하게 되면 난방모드가 된다. 현실적으로 응축기와 증발기의 위치를 바뀌며 냉방과 난방모드를 구동 시키는 것은 불가능하다. 따라서 열교환기의 본질을 이용해 흡열과 방열 과정을 증발기에서 동시에 이뤄지도록 하는 것이 히트펌프의 핵심 내용이다. 증발기의 흡열과 방열 과정의 변환은 유로 전환 밸브를 통해 가능하다. 유로 전환 밸브는 압축기에서 토출되는 유로와 흡입되는 유로를 바꿔주는 역할을 한다. 점선으로 표시되어 있는 유로가 난방모드이며, 실선으로 표시되어 있는 유로가 냉방모드이다.

히트펌프를 설계함에 있어 구성 요소를 냉방 또는 난방 모드에 최적화를 시킨 후 유로변환 밸브를 통해 히트펌프 시스템을 구축한다. 따라서 본 연구에서는 냉방 모드를 기준으로 히트펌프를 구성하였다.

Fig. 5는 AMESim에서 제공하는 Air-conditioning & Two-Phase component를 이용하여 구성된 냉동 사이클의 기본 모델이다. 이 모델에서는 압축기 모델을 사용하지 않았고, 대신 그림 1의 압축기 모델에서 해석 데이터를 입력하는 방식으로 모델링하여 해석 시간을 단축하였다.



[Fig. 5] A Heat pump model without a Compressor

냉동 사이클에서 압축과정은 등엔트로피 과정으로, 팽창밸브는 등엔탈피 과정으로 가정한다. 하지만 실제 냉동 사이클의 압축기는 엔트로피가 변한다. 또한 응축기와 증발기에서는 냉매의 점성유동으로 인해 압력 강하가 발생한다. 열교환기에서 점성유동은 내부유동으로 압력 강하량은 식 (1)을 통해 설명 할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2C_q}, C_q = f\left(\frac{e}{D_h}, \frac{L}{D_h}, Re\right) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, C_q 는 유량계수로 무차원 수이며, ΔP 는 압력강하량[N/m²], ρ 는 밀도[kg/m³], V 는 속도[m/s], D_h 는 수력반경[m], e 는 절대조도[m], L 은 길이[m], Re 는 레이놀즈 수 [무차원]이다. 일반적으로 내부유동에서 층류와 난류를 구분하는 임계 레이놀즈 수는 2100-2300이다. 하지만 히트펌프 사이클의 냉매 유동은 불안정한 유동형태를 갖으며, 자동차에 적용되는 경우 비관성계이므로 낮은 레이놀즈 수에서 천이가 일어난다.

팽창밸브는 직경이 다른 두 개의 관을 오리피스와 조합하여 구성하였다. 형상에 대한 데이터는 자동차용 냉방기를 기준으로 하였다. 따라서 응축기의 열교환 면적은 증발기의 열교환 면적보다 크다. 실제 히트펌프의 유동은 비정상 상태이며, 평형상태에 도달하기까지 온도 또한 비정상 상태이다. 따라서 대류 열전달 계수는 상수가 아닌 식 (2)와 (3)을 통해 계산된다.

$$Nu(t) = 0.08Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad \text{식 (2)}$$

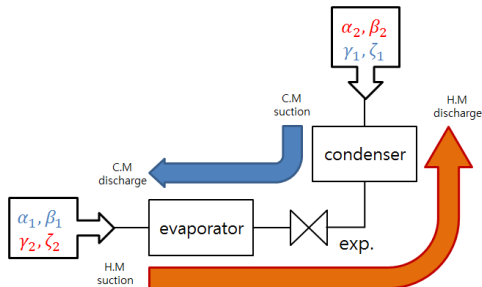
$$h = \frac{k \cdot Nu}{d} \quad \text{식 (3)}$$

여기서, Re(Reynolds number)와 Pr(Prantl number)는 무차원 수이므로 Nu(Nusselt number)도 무차원 수이다. k는 전도 열전달 계수로 W/m·k의 단위를 갖으며, d는 직경으로 m의 단위를 갖는다. 따라서 대류열전달 계수 h는 W/m²·k의 단위를 갖는다.

팬을 통해 공기를 강제 유동시켜 흡열·발열을 하는 과정을 묘사하기 위하여 Nu수는 강제유동의 가장 일반적인 실험식을 사용하였다.

Fig. 5의 냉동 사이클 해석 모델은 유로 전환 밸브가 없다. 앞서 얘기한 것처럼, 히트 펌프를 모델링하기 위해서는 유로 전환 밸브를 사용하여 유로의 방향을 바꾸어 주어야 한다. 하지만, AMESim software의 어떤 라이브러리에서도 유로 전환 밸브는 존재하지 않는다. 따라서 유로 전환 밸브와 같은 역할을 하는 알고리즘을 Fig. 6과 Table 1을 조합하여 구성하였다.

α 와 β 는 흡기시의 데이터로 입력해야 할 값이다. γ 와 ζ 는 스크롤 압축기 모델로부터 계산되어 토출되는 압력과 온도이다. 냉방모드일 때는 첨자가 1인 데이터가 입력되며, 난방모드일 때는 첨자가 2인 데이터가 입력된다.

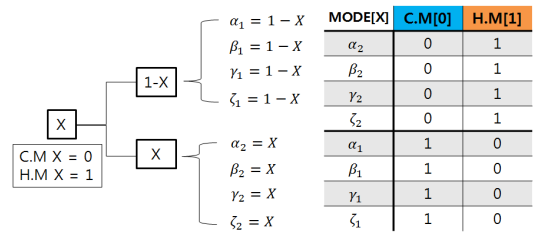


[Fig. 6] A schematic for a reversing valve

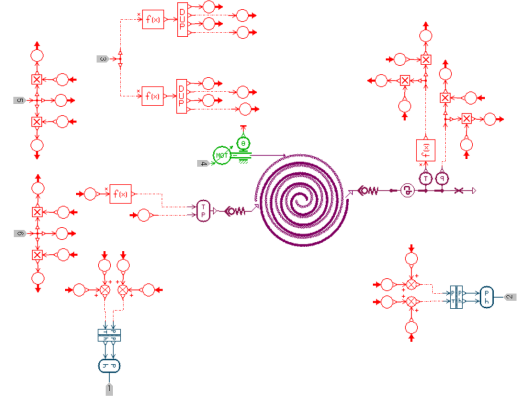
[Table 1] Setting the variable of the reversing valve

	Cooling Mode		Heating Mode	
	suction	discharge	suction	discharge
Temperature	α_1	γ_1	α_2	γ_2
Pressure	β_1	ζ_1	β_2	ζ_2

Fig. 7은 데이터의 처리를 위한 알고리즘이다. 데이터에 0 또는 1을 곱하여 그 값을 소개하거나 유지하는 방법이다. 이 알고리즘을 스크롤 압축기 모델과 signal component를 이용하여 Fig. 8과 같이 구성하였다.



[Fig. 7] Algorithm for the reversing valve



[Fig. 8] A Scroll compressor with a reversing valve

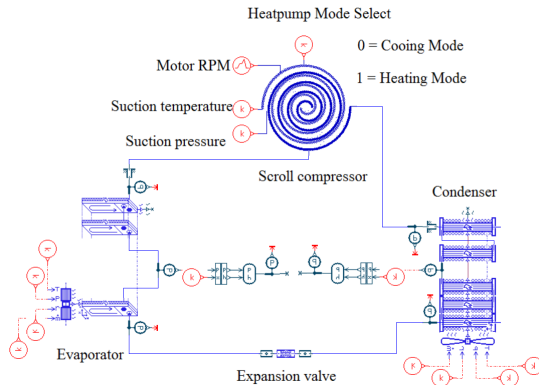
Fig. 8은 완성된 스크롤 압축기와 유로 전환 밸브 알고리즘을 적용한 모델이다. 그림 8은 AMESim에서 제공하는 supercomponent 기능을 이용하여 간략히 축소시킨 후 Fig. 9에 적용하였다.

Fig. 9는 최종 히트펌프 모델이며, 스크롤 압축기의 모드 입력값을 '0' 또는 '1'을 선택하여 히트펌프의 모드를 결정할 수 있다.

압축기 해석모델이 생략된 Fig. 5의 모델은 입력 값이 5개이다. 압축기의 흡기 온도, 압력과 토출 온도 압력 및 외기 조건을 입력해야 한다. 입력 값의 개수가 많아지는 것은 해석모델에 있어 바람직하지 못하다. 입력 값의 증가는 사용자가 해석모델을 사용함에 있어, 증가된 개수만큼 예측해야 하는 값이 많아지기 때문이다. 따라서 입력 값의 개수를 줄이는 것이 해석모델링의 바람직한 방향이다. Fig. 9의 모델은 입력 값이 3개가 필요하다. Fig. 5의 모델과 달리 스크롤 압축기 해석모델이 채택되어 토출 압력과 온도를 계산해주기 때문이다. 또한 스크롤 압축기의 경향성을 히트펌프 각각의 구성요소에 반영하기 때문에 Fig. 5에 비해 정확하고, 바람직한 결과를 도출한다.

Fig. 9의 운전 모드는 다음과 같다. 냉방모드를 계산할 경우 모드선택에 0을 입력하면, 스크롤 압축기→응축

기→팽창밸브→증발기의 순서로 작동유체가 순환한다. 난방모드의 경우 모드선택에 1을 입력하면 스크롤 압축기→증발기→팽창밸브→응축기의 순서로 작동유체가 순환한다. 따라서 하나의 모델로 스크롤 압축기가 적용된 히트펌프 시스템을 구성하였다.



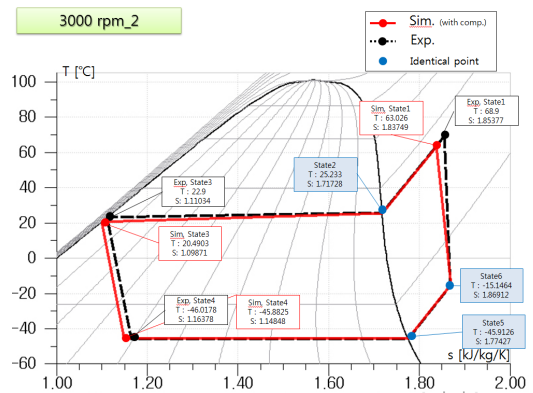
[Fig. 9] A Heat pump with a Scroll compressor

3. 해석 결과 및 검증

해석모델의 검증을 위해 차량용 냉방기로부터 얻은 실험 데이터를 이용하여 비교 분석 하였다. 차량용 냉방기는 공기 열원식 히트펌프로 개발될 가능성이 높은 기계장치이며, 냉방모드로 최적화를 한 후 히트펌프 시스템으로 변화가 용이한 최적의 기계시스템이다.

스크롤 압축기를 채택한 차량용 냉방기를 이용하여 실험을 수행하였으며, 압축기에 연결된 모터의 회전수는 1500rpm부터 3000rpm까지 변경하여 실험을 수행하였다. 해석 모델의 2500rpm 압축기, 증발기, 팽창밸브, 응축기는 2500rpm 조건에서 최적화 하였으며, 이후에는 모터의 회전 수만 변화시키며 해석 하였다.

Fig. 10은 모터의 회전수가 3000rpm인 경우, 해석 모델의 결과와 실험 결과의 T-s 선도를 도시하여 비교한 것이다. 실선이 해석 결과이고, 점선이 실험 결과이다. T-s 선도는 냉동사이클의 경향을 잘 묘사하고 있으며, 식 (1)에서 설명한 것과 같이 응축기에서 압력강하가 발생함을 알 수 있다. 하지만 증발기에서의 압력 강하는 거의 없다. 이는 자동차용 냉방기의 형상 인자를 입력했기 때문이다. 자동차용 냉방기는 차량 실내의 공간을 충분히 확보하기 위해 최소한의 크기로 증발기를 제작한다. 식 (1)로부터 압력 강하량은 작동유체가 흐르는 유로의 길이에 비례하므로 길이가 짧은 증발기에서 압력 강하량은 거의 없다.



[Fig. 10] T-s diagram for a experimental data and simulation data

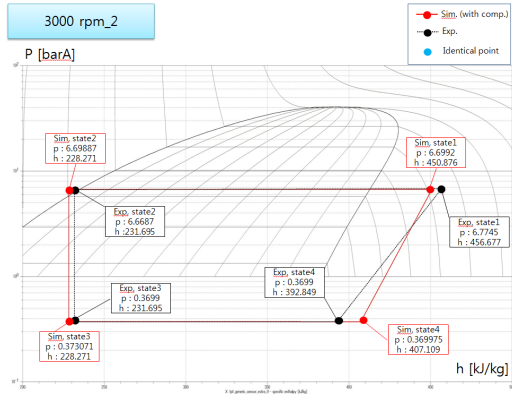
압축기에서 엔트로피가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 일반적으로 엔트로피는 증가하는 방향으로 과정이 진행된다. 하지만 소형 압축기의 경우 냉매에 의해 압축기가 지속적으로 냉각되어 엔트로피가 감소한다. 엔트로피 감소는 에너지 평형식과 엔트로피 정의 식을 조합함으로써 가능하다.

$$S = \frac{\Delta H - \Delta W}{T} \quad \text{식 (4)}$$

식 (4)는 압축기에서 에너지 평형식과 엔트로피 정의 식을 조합한 수식이다. 엔탈피는 내부에너지와 유동 일의 합이다. 내부에너지는 온도의 함수이므로 가해진 일보다 내부에너지의 증가량이 적으면 엔트로피는 감소하게 된다. 엔트로피가 감소하는 방향으로의 설계는 같은 체적을 압축할 때 더 적은 일을 소모하는 것을 의미한다. 따라서 소형 압축기의 경우 엔트로피가 감소하는 설계가 바람직하다.⁽⁸⁾ 식 (4)를 통해 해석한 것과 같이 소형 압축기에서 엔트로피가 감소함을 해석과 실험데이터로부터 알 수 있다. 전체적인 오차는 5% 이내이며, 실험의 불확실성을 고려했을 때, 해석 오차는 1% 이내로 추정 할 수 있다.

Fig. 11은 3000rpm에서 P-h 선도를 비교한 것이다. 실선이 해석 데이터이고, 점선이 실험 데이터이다. 두 데이터 모두 경향성이 매우 잘 일치한다. P-h선도는 logarithmic scale로 도시되어 응축기에서의 압력강하가 없는 것처럼 보인다. 하지만, Fig. 10의 T-s 선도는 수학적 수치 변환을 거치지 않았으므로, 응축기에서의 압력강하가 뚜렷하게 보인다. 두 그래프로부터 압력 강하가 존재하지만 그 크기가 매우 작음을 알 수 있다. 근본적으로 해석과 실험 데이터의 오차는 압축기에 의해 발생한다. 압축기를 제외한 5개의 데이터를 모두 입력하여 해석한

결과의 오차는 1%미만이다. 하지만 압축기에서 5~10%의 오차가 발생하며, 그 오차율로 인해 증발기, 응축기에서의 오차가 증가한다. 이는 실험에서의 측정 오차와 해석 결과의 오차 중첩으로 인해 발생한다.



[Fig. 11] P-h diagram for a experimental data and simulation data

4. 결론

본 연구에서는 향후 전기 자동차 냉난방 시스템으로써 각광을 받을 히트펌프 시스템 설계에 유용한 해석 모델을 개발하였다. 해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 결과를 요약하면, 두 데이터의 오차는 최종 모델에 대하여 10% 미만이었으며, 압축기 모델을 제외한 나머지 시스템의 해석 결과는 1%미만으로 실제 거동을 정확히 묘사하였다. 본 연구에서 개발한 히트 펌프 모델은 사용자가 쉽게 익히고 향후 히트펌프 시스템 개발 및 시스템 성능 최적화 연구 시 유용하게 사용될 것으로 사료되며, 다른 분야로의 응용 또한 용이할 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. D. Choi, S. H Han, S. H Choi, D. S kim, C. H. Um, "Study on the simulation of Heat Pump Heating and Cooling Systems to Resident Building", Vol. 20, No. 1, pp. 65-74, SAREK, 2008.
- [2] J. S. Kim, K. J. Lee, D. S Back, S. J Lee, H. T. Han, I. B. Lee, G. S. Han, "Performance Analysis of Heat pump using EES Program", pp. 642-647, Proc. of SAREK winter Conference, 2010.

- [3] Y. J. Baik, M. S. Kim, K. C. Chang, Y. S. Lee, H. J. Kim, "Potential Performance Enhancement of Dual Heat Pump Systems through Series Operation", Vol. 36, No. 8, pp. 797-802, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.8.797>
- [4] J. Y. Kim, S. R. Park, Y. J Baik, K. C. Chang, H. S. Ra, M. S. Kim, Y. C. Kim, "Experimental Study on Compression/ Absorption High-Temperature Hybrid Heat Pump with Natural Refrigerant Mixture", Vol. 35, No. 12, pp.1367-1373, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2011.35.12.1367>
- [5] S. Y. Jeong, H. G. Yun, K. W. Park, S. R. Park, M. S. Kim, "Numerical Simulation of a Two-Stage Hybrid Heat Pump", Vol. 34, No. 2, pp. 191-196, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2010.34.2.191>
- [6] H. G. Kim, M. S. Shin, D. U. Shin, M. S. Yeo, K. W. Kim, "The Study of Selecting Heat Pump System with Using the Outdoor Temperature and the Heating Load Analysis", Vol. 29, No. 1, pp. 801-804, Proc. of AIK, 2009.
- [7] S. S. Yim, Y. S. Lee, S. Y. Park, K. B. Kim, "Development and Validation of Simulation Model for A Scroll Compressor", Vol. 13, No. 5, KAIS, pp. 1976-1982, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.1976>
- [8] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, "Thermodynamics an engineering approach", McGraw-Hill, pp. 607-655, 2011.

임 상 식(Sang-Sik Yim)

[준회원]



- 2006년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과

<관심분야>

친환경 에너지 시스템

김 기 범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충남대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 조교수

<관심분야>

친환경 에너지 시스템

박 성 영(Sung-Young Park)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 부교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발