

# 하이브리드 열펌프 동적 모델링 및 시뮬레이션

신영기

세종대학교 열시스템 제어 실험실  
(ygshin@sejong.edu)

## 서론

한국에너지기술평가원(KETEP)은 2012년도에 ‘보일러와 히트펌프를 연계한 하이브리드 시스템 개발’이라는 과제를 공모하였다. 표 1은 해당 과제의 과업요구서 내용으로서 대부분 세대마다 구비된 보일러와 에어컨을 한 시스템으로 통합하여 1차에너지 소비량 대비 효율을 120%로 상승시키는 것이 궁극적인 목표이다. 이 목표 달성을 위한 중요한 요소기기는 열펌프로써 40℃ 온수를 5℃ 이상 가열하면서 난방 COP 3.7 이상을 달성해야 하는 어려운 기술적 과제에 직면해 있다.

보일러와 열펌프를 연계한 제품으로 독일의 Vaillant사와 Bosch사에 개발한 하이브리드 방식이 있으나 용도와 성능이 본 연구의 목표와 상이하여 직접 참조하기 어렵다. 보일러와 열펌프를 주제어로 한 하이브리드 시스템 관련 논문도 검색되지 않았다. 연구를 위한 하이브리드 시스템 시제품이 아직 제작되지 않은 상태에서 관련 연구를 하기 위한 유일한 대안은 실제와 유사한 동

특성을 모사하는 시뮬레이션 모델을 개발하는 것이다. 열펌프 시스템의 동적 모델로서 실험결과와 검증하고 제어 알고리즘 개발에도 활용되었으며 십여 년 이상 점진적인 개선을 거쳐 온 Alleyne Research Group의 Thermosys가 가장 대표적인 연구성과이다.

〈표 1〉 하이브리드 열펌프 과업 요구서

Performance		Technology Level		Target
		Domestic	Abroad	
Boiler	Capacity	-	-	20 kW
	Eff.((%)	90.3	91.2 (Vilant/EU)	>91.5*
	NOx(ppm)	40	40	< 40
Heat Pump	Capacity	-	-	2 RT
	COPH	3.3	3.5 (Daikin/Japan)	> 3.7**
Hybrid System	Condensing heat recovery	-	-	>40%***
	Combined energy	-	-	>120%****

\* SAP 2005 Annual Efficiency(SEDBUK), 20 kW range

\*\* Outdoor: Dry/wet (7℃/6℃), water entering/leaving 40℃/45℃

\*\*\* Under cooling operation

\*\*\*\* Based on primary energy consumption

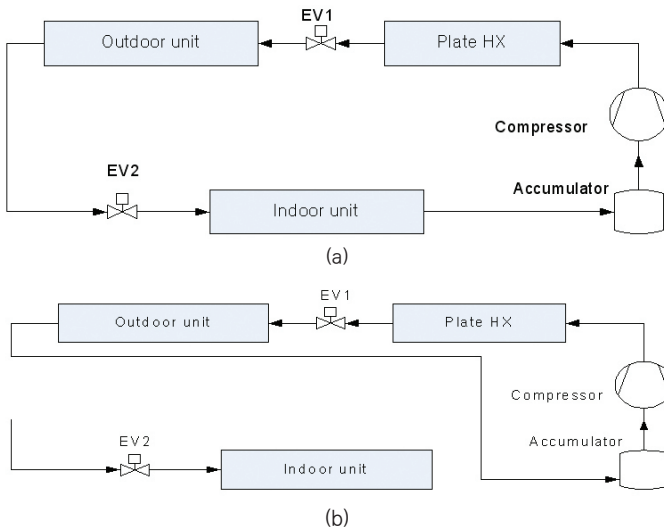
본 연구에서는 Thermosys에 구축된 기존의 공기 대 공기 열펌프의 이론적 모델에 온수가열용량형 열교환기가 추가된 동적 모델을 구성한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 이 모델은 차후에 보일러를 추가하여 연구과제가 목표로 하는 하이브리드 시스템을 가상으로 구성한 후 고장감지 및 진단 (FDD)과 자동제어 연구에 활용될 수 있다.

### 시스템의 구성

그림 1은 판형열교환기가 추가된 열펌프 시스템의 냉방 및 난방 운전모드 구성을 나타낸다. 이는 최소한의 요소기기와 접속 밸브 조합으로 냉방과 난방을 구현하는 Topology 설계 결과이다.

그림 1(a)는 급탕 겸 냉방모드로서 압축기를 떠난 과열 냉매는 판형열교환기를 거쳐 공랭식 실외 응축기를 지난다. 그림에는 표시되어 있지 않지만, 판형 열교환기와 열교환된 온수는 온수 탱크에 저장되며 적어도 45℃ 이상을 유지하도록 계속 순환된다.

냉방모드에서 팽창밸브 EV1은 완전 개방되



[그림 1] Schematic of hybrid heat pump operation (a) cooling (b) heating

어 압력손실을 줄인다. 팽창밸브 EV2는 실내기의 냉방부하에 대응하여 과열도와 냉방능력 일부를 제어한다. 압축기는 냉매저압이 목표 저압을 유지하도록 제어된다. 판형 열교환기에서 공급해야 할 온수부하의 크기에 따라 판형 열교환기 내에서 냉매가 과냉될 수도 있고 극단적으로는 과열 증기 상태로 실외기로 유입될 수도 있다. 따라서 응축부하를 제어할 수단이 필요하다. 그 수단으로서 실외기 팬은 응축압력이 일정 압력 이하를 유지하도록 풍량을 제어한다.

그림 1(b)는 난방모드를 나타낸다. 그림에서 판형열교환기는 응축기로서 바닥난방에 필요한 온수를 공급하고 실외기는 증발기로서 대기의 열을 흡수한다. 열펌프 운전이 이득인 조건에서는 열펌프로 난방열을 공급하고 그 이외의 조건에서는 보일러가 보조적으로 작동하여 부족한 난방열을 보충한다.

### 시스템 동적 모델링 개념

그림 1에서 모델링 대상은 판형 열교환기, 공랭식 실외기, 실내기, 압축기 및 팽창밸브이다. 본 연구의 모델은 제어 및 고장진단에 활용할 시뮬레이터를 개발하는 것이므로 동적 거동이 실제와 유사할 수 있는 물리적 모델이어야 한다. 이러한 관점의 동적 모델 개발에 관해 많은 연구가 진행되었으나 그중 가장 완성도가 높고 실용적인 연구성과는 Alleyne Research Group의 Thermosys이다. 이 모델은 열교환기의 유로와 열전달 과정을 1차원으로 단순화하되 냉매

상변화에 따른 액체 냉매 점유 길이를 동적으로 모사할 수 있는 방법론을 정립하였다. 실험과의 비교 및 최적제어 알고리즘의 적용을 통해 개발한 동적 모델의 실용성과 타당성을 오랜 기간에 걸쳐 실험결과와 비교 검증하고 모델을 개선해왔다. 본 연구는 이와 같은 방법론을 수용하여 연구대상인 하이브리드 열펌프 시스템에 적합하게 모델을 수정하였다.

1차원으로 가정한 대상 작동유체에 대하여 질량 및 에너지 보존 법칙을 적용한다. 길이 방향 편미분항은 Leibnitz rule을 적용하여 상미분으로 변환한다. 냉매의 압력, 상의 길이, 유체 온도는 시간에 대하여 변하는 일차 미분항을 포함하므로 이들을 상태벡터  $x$ 로 한 지배방정식들은 다음과 같은 일반형으로 표현할 수 있다.

$$Z(x,u)\dot{x} = f(x,u) \quad (1)$$

우변의 항  $f$ 는 forcing vector로서 질량 보존 방정식에서는 질량 출입, 에너지 보존 방정식에서는 해당 검사체적에 출입하는 에너지항을 나타낸다. 상태벡터  $x$ 의 미분항이 0이 아니므로 동적 거동을 나타내는 식이 된다.

반면에 팽창밸브나 압축기의 경우 시스템의 동적거동이 열용량과 관련된 열전달이 아니라 유체운동과 관련한 압력변화의 영향이므로 시스템 반응속도가 빨라 동적 거동을 별도로 모사할 필요가 없다. 즉  $u$ 의 변동에 따른 시스템 반응이 동시적으로 발생하므로 시스템 출력  $y$ 와 제어입력  $u$ 의 상관관계는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$y = g(u) \quad (2)$$

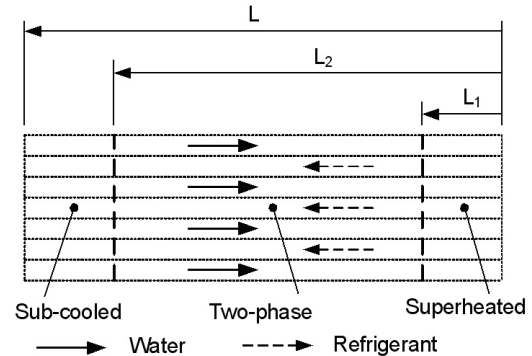
식 (1), (2)는 각각 동적 모델, 정적 모델에 대한 일반 표현식이다.

## 열교환기 모델링 예

그림 2는 냉매와 열교환하는 수냉식 판형 열교환기의 모델링 예로서 세 가지 유동영역이 존재하는 상황을 나타낸다. 실제의 경우에는 그림 2의 상황 이외에 과열증기만 존재하는 경우, 과열증기와 포화영역이 존재하는 경우가 있으며 경우별로 조건문을 분기하여 관련된 비정상 질량 및 에너지 보존 방정식을 푼다.

냉매와 공기가 열교환 하는 응축기 및 증발기 모델링은 냉매와 열교환하는 매체가 물이 아닌 공기라는 점을 제외하면 판형 열교환기의 경우와 동일한 지배방정식을 적용한다.

공랭식 응축기에는 압축기로부터 과열증기가 유입되는 것이 아니라 운전 상황에 따라서 과열, 포화 및 과냉 냉매가 판형 열교환기에서 유입되고 출구는 과냉 또는 포화상태가 되는 경우의 조합들이어서 냉매의 상별로 상관된 지배방정식에 분기해야 하고 조건이 변경되었는지 판단하여 유연하게 또 다른 조건문으로 분기해야 하는 어려운 문제가 있다. 가장 오랜 시간과 개선 노력이 필요했던 부분이다.



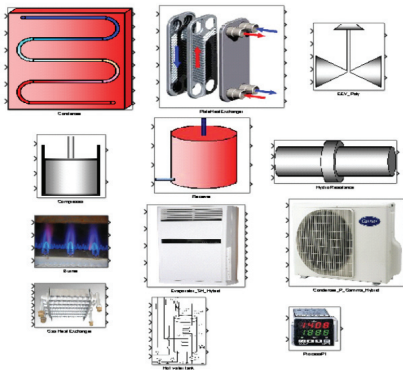
[그림 2] Plate heat exchanger modeling

### 프로그래밍 및 제어 알고리즘 설계

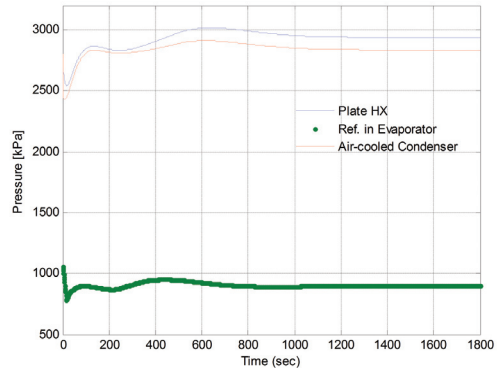
모델에서 도출된 방정식들은 Matlab/Simulink라는 상용 프로그램을 사용하여 풀었다. 적용 냉매는 R410A 이다. 시뮬링크 프로그램으로 구성된 열펌프 구성 요소 기기들은 그림 3과 같이 부품 라이브러리로 등록한 후 필요한 부품을 끌어다 속성을 부여하고 입출력을 연결하여 시스템을 구성하는 graphical programming 방식을 적용하였다. 그림 4는 열펌프와 보일러가 통합된 하이브리드 열펌프 시스템을 구성한 프로그램 예이다.

### 시뮬레이션 결과

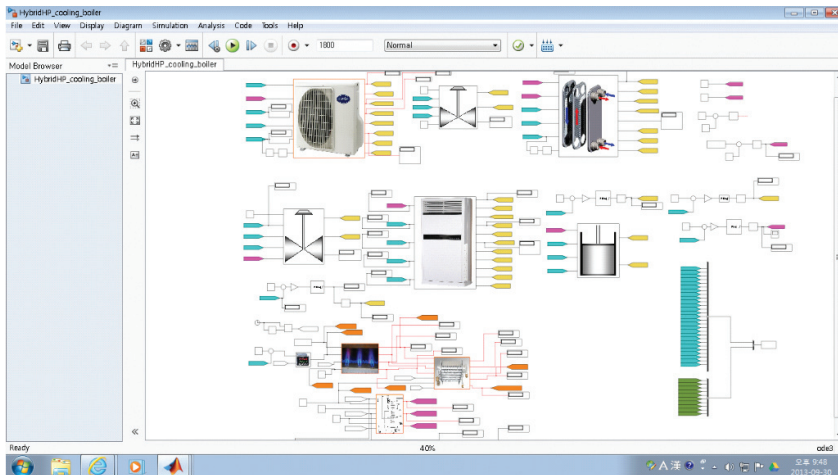
그림 5와 그림 6은 냉방운전 계산 예를 나타낸다. 그림 5는 냉매 저압, 판형 열교환기 입구와 실외 응축기 냉매 압력을 나타낸다. 일반 냉매 사이클에 비해 온수 가열용 판형 열교환기가 추가되어 있어 압력강하가 발생하는 결과 압축기 출구 압력이 실외 응축기 압력과 차이를 나타내게 된다. 그림 6은 판형 열교환기에서 가열되는 온수의 입출구 온도 거동을 나타낸다. 목표 출구온도 45℃를 추종하도록 온수 순환량을 가변 유량펌프로 PI 제어하였다. 그림에서 온수 입구온도가



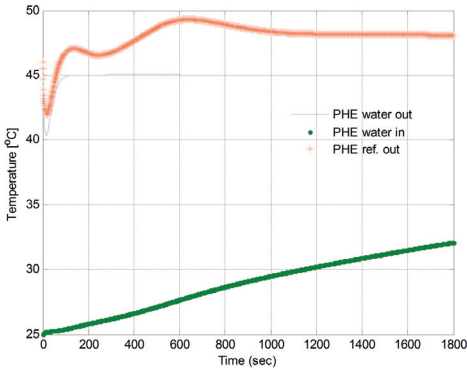
[그림 3] 히트펌프 부품 모델 라이브러리



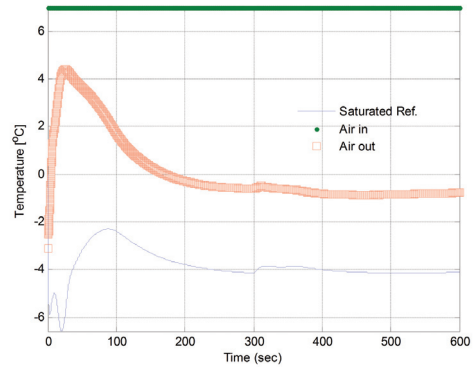
[그림 5] 냉방모드 냉매 압력 거동



[그림 4] 라이브러리 부품을 조립한 하이브리드 시스템 모델



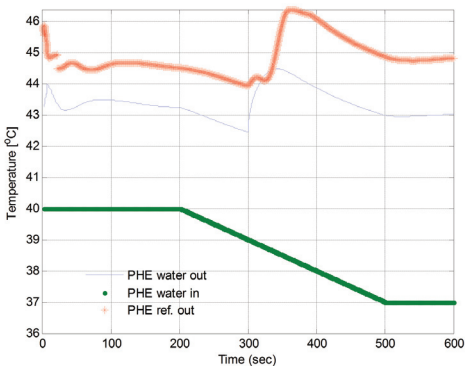
[그림 6] 판형 열교환기 내 온수 및 냉매 온도



[그림 8] 난방모드 공랭식 실외기 공기 및 냉매 온도

25°C에서 서서히 증가하는 이유는 초기 25°C인 축열탱크 내 물을 45°C로 가열하여 축열탱크 내로 재순환시키고 있기 때문이다.

그림 7과 그림 8은 난방운전 계산 예를 나타낸다. 그림 7은 온수 입구 온도 변화와 300초에서 온수 유량을 50% step down 시키는 변동에 대하여 판형 열교환기 출구 냉매의 온도 거동이 안정적이고 물리적으로 타당한 거동을 나타냄을 보여준다. 실외 증발기는 외기온도 7°C에서 영하의 온도로 공기가 냉각되면서 영하 4°C의 냉매에 외기 열을 전달하고 있다. 그 외 그림으로 명시되지 않았지만, 보일러가 작동하여 부족한 열량을 공급한다.



[그림 7] 난방모드 판형열교환기 유체 온도 거동

## 시뮬레이션의 성과

하이브리드 열펌프 시뮬레이션 연구 결과에서 보듯이 설비 산업 분야의 세계시장에서 기술 경쟁력을 확보하려면 시스템 융복합에 의한 성능 향상 및 기능 다양화가 요구된다. 문제는 이러한 아이디어의 시제품을 개발하는데 많은 비용과 시간이 소요되고 빠른 시간 내 제품을 시장에 내놓기 어려울 수 있다. 따라서 가상의 설비가 실제와 유사하도록 시뮬레이션되어 컴퓨터 상에서 조립되고 성능을 미리 평가할 수 있는 시뮬레이터 개발이 필요하다. 본 연구는 정상상태에서의 부품이나 시스템 성능뿐 아니라 기동, 정지, 부하 변동 등의 비정상 운전 영역에서 실제와 유사한 성능을 구현하도록 모델링을 시도한 것이다. 앞으로 만들어질 시제품 성능과 비교를 통하여 모델 변수 일부를 튜닝할 필요는 있으나 모델의 이론적 관점에서는 모델 개발을 안정화시켰다고 할 수 있다. 본 연구에서 개발된 주요 부품 모델들은 유사 시스템 구성을 위해 재활용될 것이고 재활용 과정에서 발생할 수도 있는 모델의 부족한 부분은 지속적으로 개선할 것이다. 그리고 성능이 안정화된 동적 모델은 시스템 고장진단용 표준 모델로 응용되어 향후 온라인 고장진단 시장을 개

적하기 위한 핵심기술이 될 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

1. B. Li, A. G. Alleyne, 2010, A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations, *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, pp. 538-552.
2. T. L. McKinley, A. G. Alleyne, An advanced nonlinear switched heat exchanger model for vapor compression cycles using the moving-boundary method, *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 1253-1264.
3. S. Bendapudi, J. E. Braun, E. A. Groll, 2008, A comparison of moving-boundary and finite-volume formulations for transients in centrifugal chillers, *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 1437-1452.
4. R. Shah, A. G. Alleyne, C. W. Bullard, B. P. Rasmussen, and P. S. Hrnjak, 2003, *Dynamic Modeling And Control of Single and Multi-Evaporator Subcritical Vapor Compression Systems*, ACRC TR-216, University of Illinois. 