

3-유체 증발기를 가진 이중열원 히트펌프의 시뮬레이션

Simulation of Dual-Source Heat Pumps with Three-Fluid Evaporators

이 재 효*
Jai - Hyo Lee

1. 서 론

에너지를 효율적으로 사용하기 위한 방법으로 히트펌프는 세계적으로 널리 사용되고 있다. 일반적인 종류로는 공기열원 히트펌프가 가장 많이 제작되고 판매되고 있다. 그러나 공기열원 히트펌프는 외부의 공기온도에 따라 보조 난방장치가 필요하며 제상문제 등으로 신뢰도에서 어려운 점이 발생되고 있다. 이에 상기한 결점들을 극복할 수 있는 하나의 방법으로 이중열원 히트펌프의 연구가 필요하다. 이중열원 히트펌프는 외부의 공기온도에 따라 공기열원 또는 물열원으로 작동한다. 만일 외부온도가 전환온도보다 떨어지면 열원이 공기로부터 물로 바뀐다. 따라서 이중열원의 히트펌프의 성능을 예측하기 위해서는 공기열원 및 물열원의 히트펌프 해석이 필요하다.

Hiller와 Glicksman¹⁾이 1976년에 처음으로 히트펌프에 대해서 모델을 개발하였다. 이 모델은 MIT 모델이라 불리며 정상상태에서 공기열원 히트펌프의 성능을 해석하였다. 좀더 자세한 공기열원의 히트펌프 모델이 1978년 Oak Ridge National Laboratory의 Ellison과 Creswick²⁾에 의해 개발되었으며 이것을 제 1판 ORNL 모델이라 하며 최근의 판은 1988년 3월에 개발되었다. 이 연구에서는 공

기열원의 ORNL 모델을 기본 프로그램으로 하여 이중열원 히트펌프 모델로 변경시켰다. 여기에 3-유체증발기모델³⁾을 제외한 모든 요소들은 ORNL 모델을 사용하였다.³⁾

2. 해석방법

공기열원 히트펌프로서 증발기를 변경시킨 ORNL 모델을 사용하였으며, 따라서 여기서는 물열원 히트펌프 모델에 대해서만 논하였다.

히트펌프는 기능적으로 2개의 주요 부분으로 나뉘어진다. 한 부분은 압축기, 응축기 및 유량조절밸브를 포함하는 고압부분이고, 나머지 부분은 증발기를 포함한 저압부분이다. 이들 두 부분의 설계변수 및 증발기와 응축기의 외부 변수들이 냉매상태에 변화를 주고 압축기 및 팽창밸브도 영향을 받기 때문에 성능계산을 위해서는 전체적으로 균형을 얻을 때까지 반복적으로 계산하여야 한다. 이 해석방법은 작동 모오드에 관계없이 냉난방 모오드에 사용할 수 있다. 그림 1은 이 연구에 사용되는 모델의 압력-엔탈피 선도를 확대한 것이다.

이 프로그램을 작동하기 위해서는 미리 다음과 같은 조건들이 주어져야 한다.

* 정회원, 전국대학교 기계공학과

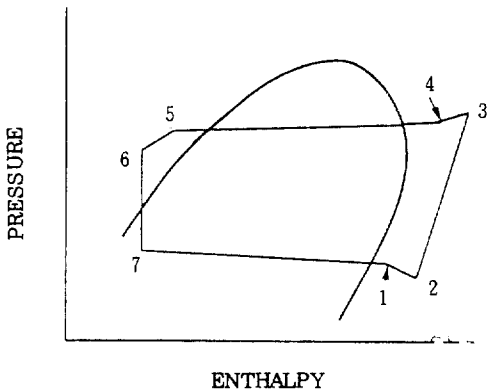


Fig.1 Pressure vs. enthalpy diagram for the heat pump cycle

- 1) 증발기 출구의 과열도
- 2) 유량조절장치에 대한 성능계수 또는 응축기 출구에서의 과냉도
- 3) 응축기 및 증발기 입구에서의 각각의 공기 및 물의 온도
- 4) 각 요소장치 및 연결파이프의 치수
- 5) 중간연결 파이프로부터의 열손실

다음의 세가지의 추정치는 각 점의 상태를 표시하기 위해서 필요하다.

- 1) 증발기 출구에서의 냉매의 포화온도
- 2) 응축기 입구에서의 냉매의 포화온도
- 3) 냉매유량

이들 세가지의 추정치는 반복계산을 위한 초기치로서 사용되며 계산된 값과 비교된다. 이 모델의 최종 결과는 이들 추정치에 무관하나 근접한 추정치가 좀더 빠르게 계산된다. 이들 계산방법 및 순서가 그림 2에 요약되어 있다.

2.1 고압측 장치

고압측 장치의 시스템 평형계산은 증발기의 냉매출구 상태에서 출발한다. 그림 2에서 점 1로 표시되며 이 점은 특정한 과열온도 조건과 포화온도의 추정치에 의해 정의된다. 이 점은 압축기, 응축기, 팽창밸브와 증발기 계산을 할때까지 변하지 않는다. 다음으로 점 2는 냉매유량의 추정치와 압축기 흡입파이프의 주어진 열손실과 치수에 의해 계산된다.

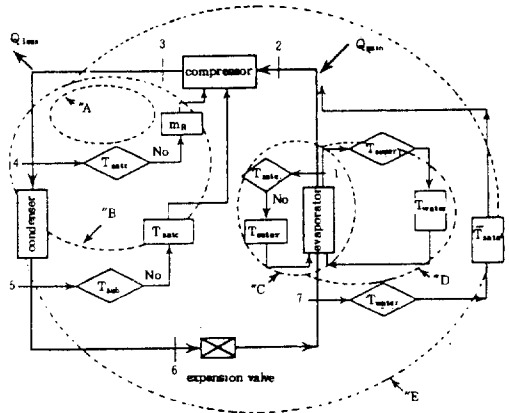


Fig.2 Solution scheme diagram for the water-source operation of dual-source heat pump

점 3은 응축기 입구의 포화온도 추정치와 압축기 모델에 의해 계산되어 진다. 점 4는 배기파이프(점 3에서 점 4까지)의 압력강하계산과 주어진 치수 및 열손실에 의해 계산될 수 있다. 점 4에서 계산된 온도가 추정된 포화온도와 비교된다. 점 4에서의 계산치와 추정치의 차가 허용오차를 넘으면 압축기의 계산이 지금까지 계산된 조건들과 새로 추정되는 냉매유량으로 다시 점 3을 계산하기 위해 반복된다. 이 반복 과정은 위의 허용오차조건이 만족될 때 까지 계속된다(그림 2의 "A" loop).

응축기 모델이 점 5의 압력과 온도를 계산하기 위해 사용된다. 계산된 과냉온도는 주어진 과냉온도와 비교되어 두 값의 차가 허용오차를 넘으면 응축기 입구의 포화온도를 다시 추정하고 지금까지 계산된 조건들과 함께 점 3의 상태를 알기 위해 압축기 모델을 다시 계산한다. 이 반복 과정이 점 5의 과냉온도가 허용오차에 들때까지 계속된다(그림 2의 "B" loop).

일단 적절한 응축기의 과냉온도가 얻어지면 액체파이프의 열손실과 압력강하를 계산하여 6점의 상태를 얻는다.

2.2 저압측 장치

팽창밸브는 등엔탈피 과정이라고 가정한다.

따라서 팽창밸브의 입출구의 엔탈피는 같다. 이 조건으로부터 증발기 입구(점 7)의 엔탈피가 얻어지고 추정된 증발기 입구의 포화온도와 함께 점 7 상태를 결정한다. 점 7의 상태와 증발기 모델을 이용하여 증발기 출구를 계산한다. 고압측 장치에서 언급되어진 것처럼 점 1의 포화온도는 점 1의 상태를 결정하기 위해 추정하였고 그것이 고압측 계산의 시작점이었다. 따라서 증발기 출구의 포화온도의 계산치와 추정치를 비교하여 합치된 포화온도가 발견될 때까지 증발기 입구의 포화온도를 변화시켜 증발기 모델을 반복 수행한다(그림

2의 "C" loop). 일단 요구되는 포화온도가 구해지면 점 1에서의 과열도를 계산하여 주어진 과열도와 계산치를 비교한다. 그 결과 두 값의 차가 허용오차를 넘으면 물의 입구온도를 변화시키면서 증발기 모델을 반복 수행한다(그림 2의 "D" loop).

마지막으로 주어진 물의 입구의 온도와 위의 계산을 위하여 변경된 온도를 비교하여 그 오차가 허용한도를 넘을 경우 다시 증발기 출구의 포화온도를 변경하고 전 계산과정을 반복한다(그림 2의 "E" loop). 이러한 반복과정을 통하여 전체 시스템의 평형조건이 얻어진다.

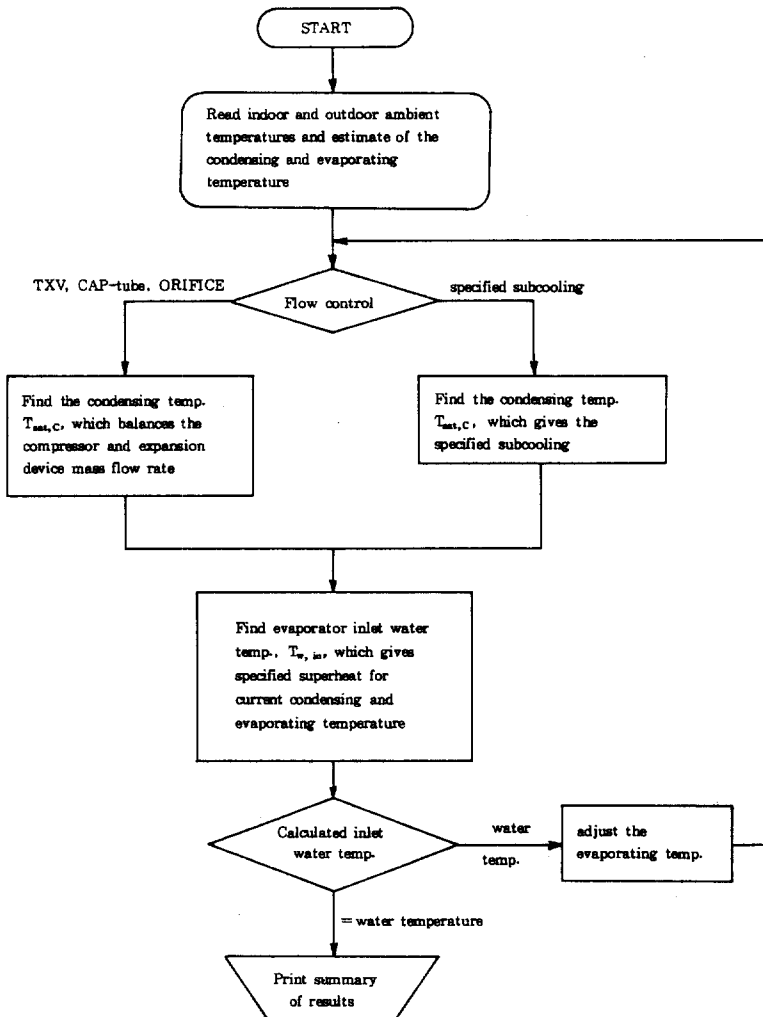


Fig. 3 Flowchart of the dual-source heat pump simulation program

3. 모델의 시뮬레이션 프로그램

이중열원 히트펌프의 프로그램은 1개의 주 프로그램과 86개의 부프로그램으로 구성되어 있으며 전체적인 흐름도는 그림 3에 나타내었다. 이들 프로그램에 필요한 열역학적 성질계산, 압력강하 계산 및 열전달계수를 계산하는 프로그램 등으로 구성되어 있다.

4. 최적 설계

이 연구에서 최적설계의 목적은 가장 경제적인 히트펌프 보다는 가장 효율적인 것을 설계하는 것으로 하였다. 따라서 모든 제한조건 등에는 경제적인 것이 관련된 것이 없다. 여기에는 경제적인 것을 구하는 목적변수들이 모호해서 아직 시기상조라고 고려한 것이다.

4.1 독립변수들의 선택

이 연구에서는 공기열원 모오드와 동일한 응축기, 압축기 및 팽창변을 사용하여 3-유체 증발기에 대해서만 최적과정을 행하였다. 다음은 독립변수로 채택한 것이다.

- 증발기의 길이
- 증발기로 들어가는 물의 유량
- 증발기 튜브의 열수
- 응축기 출구의 과냉도

4.2 제한 함수

제한 조건으로서 증발기의 최대길이 및 증발기에 들어가는 최대의 유량을 사용하였으며 나머지는 자유 조건으로 하였다.

4.3 MINOS 알고리즘

MINOS의 첫번째 판은 1980년 Murtagh 및 Saunders에 의해 개발되었으며, Version 5.1은 이 연구를 위해 Stanford 대학에서 구입하였다. MINOS는 4가지 주요 분야에서 Smooth 함수의 최적치를 구할 수 있다.

- 선형 프로그래밍
- 비 제한 최적화 프로그램
- 선형적인 제한함수 프로그램

• 비 선형의 제한함수

이 연구의 최적화를 위한 블록 유동도는 그림 4에 표시되어 있다. 그림 4의 목적함수(F-UNOBJ), 제한함수(FUNCON) 그리고 2개의 입력자료(SPECS, MPS)는 이 패키지가 작동되기 위해서 제공되어야 한다.

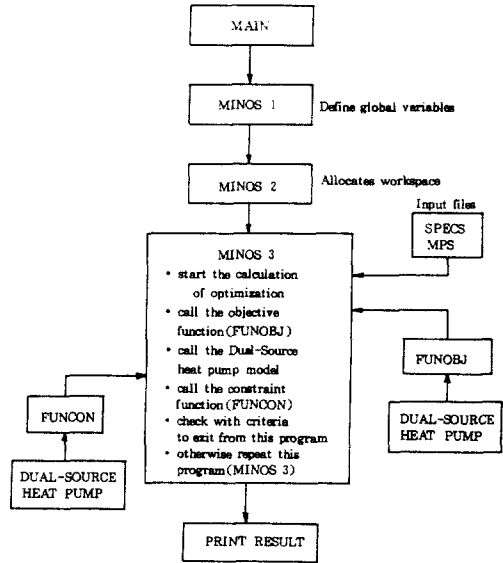


Fig.4 Block diagram of the optimization model for dual-source heat pump

4.4 최적 설계 결과

MINOS를 특정한 예제에 대해서 최적 증발기의 설계를 위해 사용하였으며 그 결과는 아래와 같다.

- 과냉도 : 22 F
- 증발기의 열의 수 : 4
- 증발기의 길이 및 물의 유량은 주어진 제한 조건의 최대치를 나타내고 있다. 즉 1.5 lb/sec 와 100 ft.

5. 특정 예제에 대한 시뮬레이션 결과

이 시뮬레이션 프로그램은 이중열원 히트펌프의 성능을 조사하기 위해서 입력 자료를 가지는 특정한 예제들에 적용되었다. 특정한 예제들에 대한 간단한 자료가 아래에 나타내었

다(보다 자세한 자료는 참고문헌 (3)의 EXA-MPLE 3. HET 과 EXAMPLE 1. HET).

1) 예제 1

- 난방 모오드
- 증발기 입구 공기온도 : 47 F
- 증발기 입구 물온도 : 47 F
- 압축기 입구 과열도 : 18.4 F
- 압축기 배기세척 : 3.6cubic inch
- 전동기 회전수 : 3,450.0rpm
- Map-based 압축기 입력자료

2) 예제 2

- 난방 모오드
- 증발기 입구 공기온도 : 47 F
- 증발기 입구 물온도 : 47 F

- 압축기 입구 과열도 : 10.0 F
- 압축기 배기세척 : 4.5cubic inch
- 전동기 회전수 : 3,450.0 rpm
- Map-based 압축기 입력자료

이 시뮬레이션 결과는 Table 1과 Table 2에 표시되어 있다.

6. 결론 및 고찰

공기열원인 경우 ORNL 히트펌프 모델³⁾이 성능계산을 위해 사용되었다. 그 결과는 O-RNL⁸⁾에서 행한 실험 자료와 비교하여 정확한 값을 갖는 것으로 나타났다. 물열원의 히트펌프 성적계수는 그림 5에 표시되고 ORNL

Table1. Comparison of COP between air- source and water-source heat pump for Example 1

	No. of rows of evaporator	Capacity of evaporator (BTU/hr)	COP	Inlet temp. to evaporator (air/water)	Total input (W)	Subcooling temperature (F)
Air-source	5	30768.5	2.271	47.0 F	5039.0	45.0
	5	30942.4	2.321	47.0 F	4915.0	25.0
	5	30860.1	2.322	47.0 F	4905.0	22.0
	5	30793.5	2.321	47.0 F	4889.0	20.0
	5	30589.1	2.318	47.0 F	4865.0	15.0
	5	30333.5	2.312	47.0 F	4841.3	10.0
	5	30028.9	2.302	47.0 F	4819.4	5.0
	Water-source	2	30481.6	2.667	47.0 F	4819.4
3		31743.6	2.703	47.0 F	4317.4	22.0
4		31953.2	2.709	47.0 F	4334.5	22.0
5		31773.4	2.704	47.0 F	4320.4	22.0
6		31737.2	2.702	47.0 F	4315.5	22.0
7		31447.3	2.693	47.0 F	4291.5	22.0
8		31171.1	2.686	47.0 F	4269.6	22.0

Table2. Comparison of COP between air-source and water-source heat pump for Example 2

	No. of rows of evaporator	Capacity of evaporator (BTU/hr)	COP	Inlet temp. to evaporator (air/water)	Subcooling temperature (F)
Air-source	3	28145.1	3.048	47.0 F	11.0
Water-source	3	29922.1	3.607	47.0 F	11.0
	5	29838.1	3.605	47.0 F	11.0

의 공기열원자료와 비교 되었다. 비교결과 이중열원의 물열원 모오드인 경우 공기열원의 히트펌프보다 20% 정도 성능이 높은 것으로 나타났다. 이 연구에서 증발기 입구의 공기 및 물의 온도는 47 F로 계산되었다.

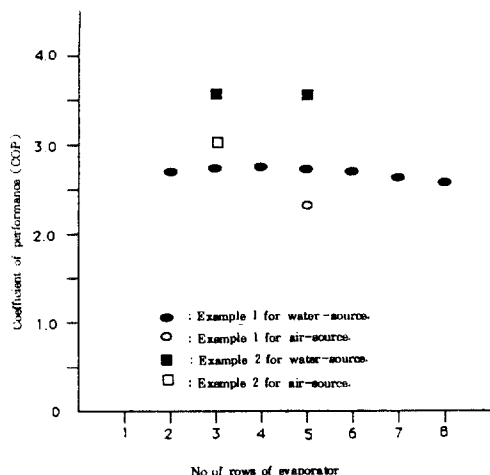


Fig. 5 Comparison of COP between the water-source operation of dual-source heat pump and air-source heat pump with variation of the number of rows of evaporator

- 예제 1 : 물열원 작동 ; 3.6 COP vs. ORNL 공기열원 : 3.0 COP
- 예제 2 : 물열원 작동 ; 2.7 COP vs. ORNL 공기열원 : 2.3COP

이들 값은 Reistad¹⁰⁾의 연구결과와 약간 다르다. 그의 연구에서는 물 및 공기의 증발기 입구온도는 46F로 하였으며, 가장 좋은 공기열원 히트펌프의 성능계수보다 물열원 히트펌프의 성능계수가 30% 정도 높은 것으로 나타났다.

- 이중열원 장치의 물열원 모오드 : 4.0 COP
- 난방 공기열원 히트펌프 : 2.7 COP
- 공기열원 장치중 가장 좋은 상업용 히트펌프 : 3.1 COP

이들 자료와 비교하여 이 연구에서 개발된 모델은 같은 온도의 증발기 조건에서 작동하는 공기열원 히트펌프보다 20% 성능이 향상

된다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Hiller, C.C and Glicksman, L.R., "Improving Heat Pump Performance via Compressor Capacity Control - Analysis and Test," Report No.24525-96, Heat Transfer Lab., MIT, 1976.
2. Ellison, R.D. and Creswick, F.A., "A Computer Simulation of Steady-State Performance of Air-to-Air Heat Pump," ORNL/CON-16 (March), ORNL, 1978.
3. Rice, C.K. and Fisher, S.K., "The Oak Ridge Heat Pump Design Model: Mark III version program Documentation," ORNL/TM-10192, March 1988.
4. Lee, Jai-Hyo, "Analysis of Three-Fluid Evaporators for the Dual-Source Heat Pumps," Kon-Kuk Academic Journal, Kon-Kuk Univ. 1989.
5. Murtagh, B.A. and Saunders, M.A., MINOS 5.1 USER'S GUIDE, Depart. of Operation Res., Stanford Univ., Technical Report SOL 83-20R, Dec. 1983, Revised Jan. 1987.
6. Ellison, R.D., et al., "Heat Pump Modeling: A Progress Report," Proceedings of the Fourth Annual Heat Pump Technology Conference, Oklahoma State Univ., Stillwater, April 9-10, 1979.
7. Rice, C.K. et al., "Design Optimization and the Limits of Steady-State Heating Efficiency for Conventional Single-Speed Air-Source Heat Pumps," ORNL/CON-63, ORNL, 1981.
8. Domingorena, A.A., "Performance Evaluation of a Low First-Cost Tjree Ton, Air-to-Air Heat Pump in the Heating Mode," ORNL/CON-18, Oct. 1978.
9. Miller, W.A., "The Influence of Ambient Temperature and Relative Humidity on the

Heating Mode Performance of a High-Efficiency Air-to-Air Heat Pump," Master Thesis, Univ. of Tennessee, 1980.

10. Reistad, G.M., "Evaluation of Dual-

Source Evaporator for Residential Heat Pumps," ASHRAE Trans. Vol.91, Part 2, 1985.