

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.191

2단 압축 하이브리드 히트펌프의 특성 시뮬레이션<sup>§</sup>

정시영<sup>\*†</sup> · 윤한구<sup>\*</sup> · 박기웅<sup>\*</sup> · 박성룡<sup>\*\*</sup> · 김민성<sup>\*\*</sup>

\* 서강대학교 기계공학과, \*\* 한국에너지기술연구원

Numerical Simulation of a Two-Stage Hybrid Heat Pump

Siyoung Jeong<sup>\*†</sup>, Han-Gu Yun<sup>\*</sup>, Kiwoong Park<sup>\*</sup>, Seong-Ryong Park<sup>\*\*</sup> and Minsung Kim<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,

\*\* Korea Institute of Energy Research

(Received September 21, 2009 ; Revised December 31, 2009 ; Accepted December 31, 2009)

**Key Words:** Hybrid Heat Pump(하이브리드 히트펌프), Single-Stage(1단 압축), Two-Stage(2단 압축), Cycle Simulation(사이클 시뮬레이션)

**초록:** 기존의 증기압축식과 흡수식을 결합한 하이브리드 히트펌프는 50℃정도의 저열원에서 80~90℃의 온수를 효과적으로 생산할 수 있다. 본 연구에서는 EES를 사용하여 2단 압축 하이브리드 히트펌프와 1단 압축 하이브리드 히트펌프의 성능을 비교하였다. 동일한 작동조건에서 2단 압축 하이브리드 히트펌프는 1단 압축 하이브리드 히트펌프보다 약간 높은 COP를 가지며 더 안정적인 상태에서 운전이 가능한 것으로 나타났다. 2단 압축 하이브리드 히트펌프에서 작동 유체의 최대 온도는 1단 압축 하이브리드 히트펌프보다 40K정도 낮게 나타났으며 이는 윤활유의 작동에 무리없는 운전상태를 가능하게 한다. 1단과 2단 하이브리드 히트펌프 모두 UA값이 증가할 때 COP는 감소하였으며 열출력은 증가하였다.

**Abstract:** Hybrid heat pumps, which combine the vapor compression and absorption heat pump cycle, can efficiently produce hot water of 80°-90°C from the low temperature of ~50°C. In this study, the performance of a two-stage hybrid heat pump (HHP) was compared with a single-stage hybrid heat pump using EES (Engineering Equation Solver). For the same operating conditions, the two-stage HHP showed a slightly higher COP (Coefficient Of Performance) and more stable operating conditions than the single-stage HHP. Moreover, the maximum working fluid temperature of the two-stage HHP was found to be lower than that of the single-stage HHP by about 40 K, which makes the working conditions of the lubricating oil safer. The COPs of both systems decreased with increasing UA-values. However, the heat output of the HHP was increased at the same time.

- 기호설명 -

A : 열전달 면적 [m<sup>2</sup>]  
 COP : 성능계수  
 h : 엔탈피 [kJ/kg]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]  
 $\dot{Q}$  : 열전달율 [kW]  
 $\dot{W}$  : 일률 [kW]  
 U : 열전달계수 [kW/m<sup>2</sup>·K]  
 $\dot{v}$  : 체적유량 [m<sup>3</sup>/s]

하첨자

abs : 흡수기  
 comp : 압축기  
 des : 발생기  
 dshttr : 감온기 (desuperheater)  
 lmttd : 대수 평균 온도차  
 pump : 펌프  
 w : 물

1. 서 론

하이브리드 히트펌프는 압축식 사이클과 흡수식 사이클이 결합된 형태로서 흡수기와 발생기의 열 교환 과정에서 온도구배(temperature glide)를 활용할 수 있기 때문에 기존의 압축식 히트펌프에 비하여 저온 폐열을 좀 더 효율적으로 활용할

그리스문자

$\eta$  : 등엔트로피 효율

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, syjeong@sogang.ac.kr

수 있는 장점이 있다.<sup>(1)</sup>

기본적인 1단 압축 하이브리드 히트펌프의 성능은 수치 해석적으로 저자 등에 의하여 연구되었으며 단순한 압축식 히트펌프에 비해 동일 조건에서 COP가 높은 것이 확인되었다.<sup>(2,3)</sup> 1단 압축 하이브리드 히트펌프는 구성이 간단하지만 5 정도의 압축비가 요구되므로 실제 시스템을 구성하는데 어려움이 예상된다. 그러므로 본 연구에서는 2단 압축 하이브리드 히트펌프의 수치해석을 EES32 프로그램을 이용하여 수행하고 성능특성을 비교, 분석하였다. 가능한 동일한 조건하에서 1단 압축 사이클과 2단 압축 사이클을 구성하고, 설계점에서의 성능특성을 비교하였다. 이어서 각 사이클의 운전조건의 변화에 따른 COP와 열 출력의 변화를 살펴보았다.

## 2. 사이클 구성 및 특성

### 2.1 1단 압축 하이브리드 히트펌프

본 연구에서 고려한 1단 압축 하이브리드 히트펌프의 개념도를 해석 시 사용한 node번호와 함께 Fig. 1에 나타내었다.

1단 압축 하이브리드 히트펌프의 압축기(COM)에서 압축된 증기는 흡수기(ABS)에 흡수되어 유용한 열을 방출하며, 발생기(DES)에서는 냉매증기를 흡수하여 묽어진 용액이 폐열원으로부터 열을 받아 농축된다. 즉, 하이브리드 히트펌프의 흡수기는 압축식 시스템의 응축기 역할을 하며, 발생기는 증발기 역할을 수행한다. 그래서 하이브리드 히트펌프를 보통 용액순환부를 가진 증기 압축식 사이클 (VCCSC; Vapor Compression Cycle with Solution Circuit)로 부르기도 한다.<sup>(1)</sup> 사이클의 효율을 높이기 위하여 희용액과 농용액 사이에는 용액 열교환기(SHX)가 설치되며, 압축식과 달리 용액을 이송하는 용액펌프(P)가 필요하다.

### 2.2 2단 압축 하이브리드 히트펌프

2단 압축 하이브리드 히트펌프의 작동 원리는 1단 압축 하이브리드 히트펌프와 같다. Fig. 2에서 보듯 2단 압축 사이클에서는 저압 압축기(COM1)와 고압 압축기(COM2)에 의해 냉매증기가 압축된다. 이차 용액열교환기(SHX2)는 저압 압축기에서 압축된 냉매증기를 중간냉각하여 고압 압축기를 통과한 증기의 최종온도가 지나치게

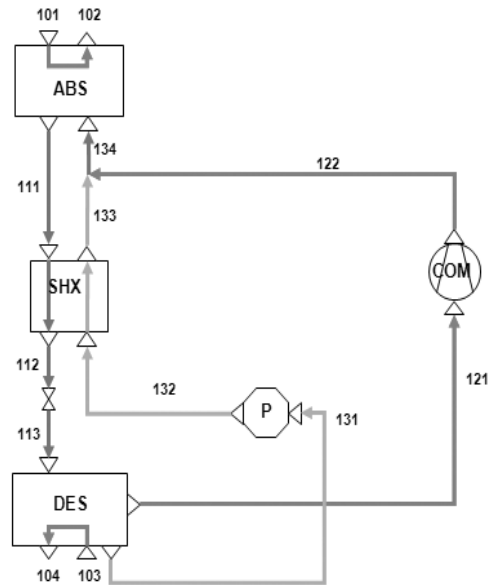


Fig. 1 Single-stage hybrid heat pump cycle

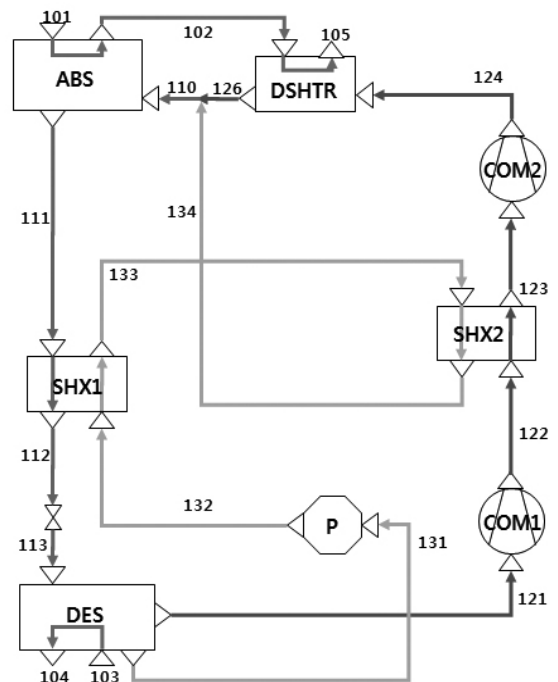


Fig. 2 Two-stage hybrid heat pump cycle

상승하는 것을 방지함으로써 시스템의 성능 및 신뢰성을 향상시킨다. Desuperheater(DSHTR)에서는 고온의 과열증기가 냉각되며, 흡수기를 거친 온 공정수의 온도를 추가적으로 상승시킨다.

### 2.3 사이클 시뮬레이션 방법

각 시스템의 정상상태(steady state) 사이클 시뮬레이션을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 시스템의 작동 유체는 암모니아/물이다.
- 흡수기와 발생기는 대향류 열교환기이다.
- 흡수기와 발생기의 출구는 포화 상태이다.
- 펌프와 압축기의 효율은 일정하다.
- 각 요소와 배관에서의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 각 시스템의 열출력은 10 kW이며 배출되는 공정수의 온도는 80°C이다.

각 시스템 해석을 위해 각 요소에 대해 질량 보존, 에너지 보존과 농도에 대한 보존방정식을 사용하였다.

열전달에는 UA-LMTD방법이나 ε-NTU 방법을 사용하였으며, 이 값을 용액과 공정수 혹은 폐열 원 쪽에서 계산한 값과 같게 하여 계산을 수행하였다.<sup>(2,3)</sup>

$$\dot{Q}_{sol} = \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \quad (1)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_e - T_i) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{lmtd} = UA \times \Delta T, \dot{Q}_{NTU} = \epsilon \times C_{min} \Delta T \quad (3)$$

$$\therefore \dot{Q}_{sol} = \dot{Q}_w = \dot{Q}_{lmtd} (= \dot{Q}_{NTU}) \quad (4)$$

압축기와 펌프에서 소요되는 일은 주어진 등엔트로피 효율을 이용하여 식 (5)와 (6)으로 구하였으며, 각 시스템의 COP는 식 (7)과 식 (8)과 같이 구하였다. 각 시스템에 관련된 수식들은 EES를 사용하여 수치해를 구하였다.<sup>(4)</sup>

$$\dot{W}_{comp} = \frac{\dot{W}_{comp_s}}{\eta_{comp}} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{pump} = \frac{\dot{W}_{pump_s}}{\eta_{pump}} \quad (6)$$

$$COP_{1-stage} = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{W}_{comp} + \dot{W}_{pump}} \quad (7)$$

$$COP_{2-stage} = \frac{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{dshtr}}{\dot{W}_{comp1} + \dot{W}_{comp2} + \dot{W}_{pump}} \quad (8)$$

Table 1 Input values at design conditions

|                 |                  | Single-stage Hybrid heat pump |         | Two-stage Hybrid heat pump    |                  |
|-----------------|------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------|------------------|
| UA value (kW/K) |                  | Absorber                      | 1.0     | Absorber                      | 1.0              |
|                 |                  |                               |         | Desorber                      | 1.0              |
|                 |                  | Desorber                      | 1.0     | DSHTR                         | 0.042            |
|                 |                  | SHX                           | 0.1     | SHX1                          | 0.05             |
|                 |                  |                               |         | SHX2                          | 0.05             |
| Water           | inlet Temp (°C)  | Absorber                      | 50      | Absorber                      | 50               |
|                 |                  | Desorber                      | 50      | Desorber                      | 50               |
|                 | $\dot{m}$ (kg/s) | Absorber                      | 0.08    | Absorber                      | 0.08             |
|                 |                  | Desorber                      | 0.06    | Desorber                      | 0.06             |
| Compressor      |                  | Efficiency (%)                | 80      | Efficiency (%)                | 80               |
|                 |                  | $\dot{v}$ (m <sup>3</sup> /s) | 0.00316 | $\dot{v}$ (m <sup>3</sup> /s) | 0.00316          |
|                 |                  | Compression ratio             | 5       | Compression ratio             | 4.89 (2.32*2.11) |
| Pump            |                  | Efficiency (%)                | 50      | Efficiency (%)                | 50               |
|                 |                  | $\dot{m}$ (kg/s)              | 0.012   | $\dot{m}$ (kg/s)              | 0.012            |

사이클 시뮬레이션을 위한 설계 조건에서의 입력 값은 Table 1에 나타나 있다. 2단 압축 하이브리드 히트펌프는 용액열교환기가 2개 이므로, 각각에 대하여 1단 압축 하이브리드 히트펌프의 용액열교환기 UA 값의 절반을 적용하였다. 압축기와 펌프에 흐르는 유량은 두 히트펌프에서 모두 동일하게 가정하였다. 설계점에서 열출력 10kW를 맞추기 위해 압축기에서의 압축비를 조절하였으며 그 값은 1단 압축 하이브리드 히트펌프에서 5, 2단 압축 하이브리드 히트펌프에서는 1단 압축기에서 2.32, 2단 압축기에서 2.11로 주어졌다.

2단 압축 하이브리드 히트펌프의 총 압축비는 1단 압축기와 2단 압축기에서의 압축비의 곱으로 정의되며, 그 값은 표에 나타난 바와 같이 4.89이다.

Table 2 Calculation results

|                                      | Single-stage Hybrid heat pump |      | Two-stage Hybrid heat pump |      |
|--------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------|
| <b>COP</b>                           | 4.53                          |      | 4.60                       |      |
| <b>Water outlet temperature (°C)</b> | Absorber                      | 79.9 | DSHTR                      | 80   |
|                                      | Desorber                      | 19.1 | Desorber                   | 19   |
| <b>Q (kW)</b>                        | Absorber                      | 10   | Absorber +DSHTR            | 10   |
|                                      | Desorber                      | 7.80 | Desorber                   | 7.82 |
| <b>Compressor pressure (bar)</b>     | Inlet                         | 2.85 | Inlet                      | 2.97 |
|                                      | Outlet                        | 14.2 | Outlet                     | 14.5 |
| <b>Compressor temperature (°C)</b>   | Inlet                         | 14.4 | Inlet                      | 14.9 |
|                                      | Outlet                        | 167  | Outlet                     | 127  |
| <b>Total work (kW)</b>               | 2.21                          |      | 2.18                       |      |

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

#### 3.1 설계점에서의 결과 비교

설계점에서 두 히트펌프의 계산결과는 Table 2와 같이 나타난다. 2단 압축 하이브리드 히트펌프에서 COP는 0.07 높은 4.60로 COP 향상이 미미함을 알 수 있다. 이는 1단 압축 하이브리드 히트펌프와 작동조건을 대부분 동일하게 설정하였기 때문으로 생각된다.

압축비가 비슷하여 압축기에서 토출되는 냉매 증기의 최종 압력은 비슷하지만 온도는 2단 압축 하이브리드 히트펌프가 127°C로 1단 압축 하이브리드 히트펌프의 167°C보다 40°C가량 낮았다. 이는 1단과 2단 압축기 사이에 용액 열교환기를 두어 용액 증기의 중간냉각을 유도하였기 때문이며 시스템의 성능과 신뢰성에서 2단 압축 하이브리드 히트펌프가 우수함을 확인할 수 있다. 실제 압축기에서 압축기 오일의 온도가 140°C 정도 유지되어야 하는 것을 생각하면 1단 압축시스템의 압축기 출구온도는 너무 높은 것으로 판단된다.

#### 3.2 유량과 압축비의 영향

압축기를 통과하는 체적유량의 변화가 시스템

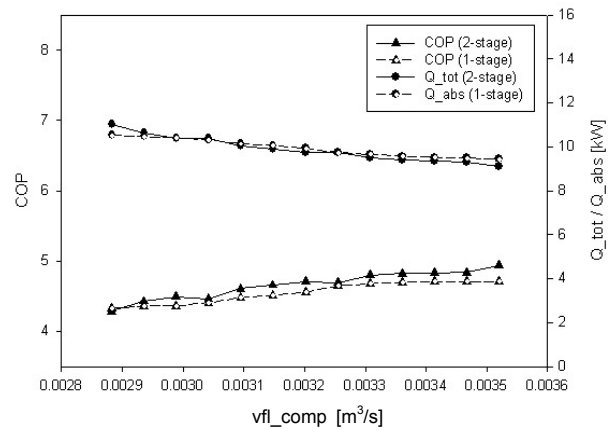


Fig. 3 Effect of volume flow rate of compressor on COP and heat output

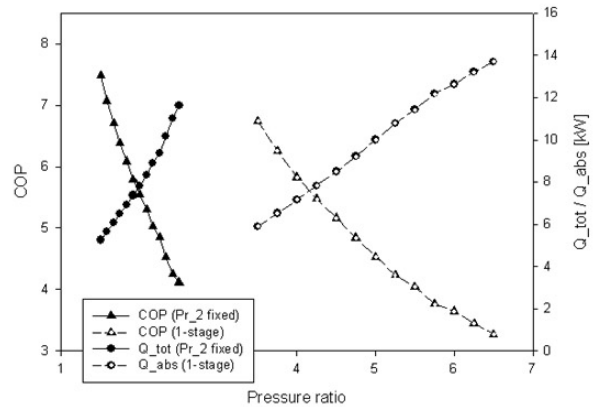


Fig. 4 Effect of pressure ratio of compressor on COP and heat output

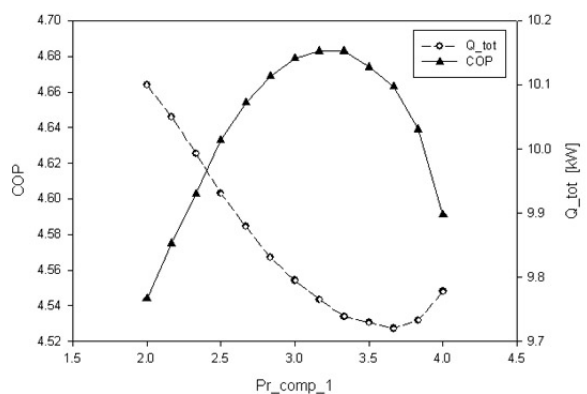


Fig. 5 Effect of pressure ratio of compressor in 2-stage HHP on COP and heat output

에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구의 시뮬레이션 방법에 의하면 시스템의 다른 조건들을 동일하게 유지한 상태에서 압축기에서의 체적유량을 증가시키면 재생기의 압력이 감소하게 된다. 이러한 증발압력 감소는 실제 압축식

히트펌프에서도 나타나는 경향이며, 재생기에서 압력이 감소하면 이에 따라 증기의 밀도가 감소한다. 질량유량은 체적유량과 밀도의 곱이므로 체적유량이 증가하더라도 증기밀도의 감소정도가 더 크면 압축기에서의 질량유량은 감소하게 된다. 질량유량이 감소하면 열출력은 감소하지만, 시스템을 구성하는 각 열교환기는 좀 더 가역적으로 작동하므로 COP는 상승한다.

Fig. 4에는 압축비의 변화에 따른 COP와 열출력의 변화가 표시되어 있는데, 2단 압축의 경우는 2단 압축비는 2.11로 고정하고 1단 압축비만을 변화시킨 결과이다. 압축비를 증가시키기에 따라 COP는 감소하고 열출력이 증가하는 경향을 나타낸다. 일반 압축식 히트펌프에서 압축비를 증가시키면 열공급(증발기)과 열방출(응축기)의 온도차가 증가하여 COP가 감소하는 것과 마찬가지로, 하이브리드 히트펌프에서도 흡수기와 재생기의 온도차가 커지므로 COP는 감소한다. 그러나, 흡수기와 발생기에서 용액과 온수사이의 온도차가 증가하게 되어 열출력은 증가한다.

Fig. 5는 2단 압축 하이브리드 히트펌프의 전체 압축비를 4.89로 고정한 상태에서 1단 압축기의 압축비를 변화시킨 경우에 대하여 COP와 열출력을 나타낸 것이다. COP는 1단 압축기의 압축비의 증가에 따라 상승하다가 압축비가 3.3 정도에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 포물선 형태의 변화를 보여주고 있다. 열출력은 압축비의 증가에 따라 감소하다가 압축비 3.6 정도에서 최소값을 보이고 다시 약간 증가하는 경향을 보인다.

COP를 최대로 하는 압축비까지는 COP와 열출력의 변화가 서로 상반되는 경향을 보이므로, COP와 열출력 중 무엇을 우선시 하는가에 따라 설계시 1차 압축기의 압축비 선택의 폭이 존재한다. 예를 들면, 최대의 COP를 얻고자하는 경우에는, 1단 압축기의 압축비를 최초 설계 압축비(2.32)보다 높은 3.3 정도의 값을 택하는 방향으로 설계점이 변경될 수 있다. 물론 이 경우에는 열출력은 최초 설계점에 비하여 약간 감소하게 되는데, 압축비 3.3에서 열출력은 9.74kW로서 설계치(10kW)에 2.6% 부족한 값을 나타냈다. 1차 압축기의 압축비를 3.3 이상으로 과도하게 증가시키는 것은 열출력의 변화가 거의 없는 상태에서 COP가 급격히 감소하는 결과를 가져오므로 피해야 한다.

## 4. 결 론

하이브리드 히트펌프와 압축식 히트펌프에 대한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 운전조건, 압축비, 열교환기에서의 UA값을 각 시스템에 동일하게 가정하여 계산한 결과, 2단 압축 하이브리드 히트펌프는 1단 압축식 하이브리드 히트펌프와 COP는 비슷하였으며 압축기 출구온도는 40°C 가량 감소하였다.

(2) 1단과 2단 하이브리드 히트펌프에서 용액증기의 체적유량을 증가시키면 재생기의 압력이 감소하고 이에 따라 증기의 밀도가 감소한다. 질량유량은 체적유량과 밀도의 곱이므로 체적유량이 증가하더라도 증기밀도의 감소정도가 더 크게 되어 압축기에서의 질량유량은 감소하게 된다. 질량유량이 감소함에 따라 열출력은 감소하지만, 시스템을 구성하는 각 열교환기는 좀 더 가역적으로 작동하므로 COP는 상승한다.

(3) 일반 압축식 히트펌프에서 압축비를 증가시키면 열공급과 열방출의 온도차가 증가하여 COP가 감소하는 것처럼 하이브리드 히트펌프에서도 흡수기와 재생기의 온도차가 커지므로 COP는 감소한다. 그러나, 흡수기와 발생기에서 용액과 온수사이의 온도차는 증가하여 열출력은 증가한다.

(4) 2단 압축 하이브리드 히트펌프에서 전체 압축비를 고정한 상태에서 두 압축기의 압축비를 변화시킨 결과, COP를 최대로 하는 1차 압축기의 압축비(약 3.3)까지는 COP와 열출력의 변화가 서로 상반되는 경향을 보였다. 이는 COP와 열출력의 상대적 중요도에 따라 1차 압축기의 압축비 선택의 폭이 존재한다는 것을 의미한다. 1차 압축기의 압축비를 3.3 이상으로 과도하게 증가시키는 것은 열출력의 변화가 거의 없는 상태에서 COP가 급격히 감소하는 결과를 가져오므로 피해야 한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 2단 압축 하이브리드 히트펌프는 1단 압축 하이브리드 히트펌프에 비해 시스템의 안정성 측면에서 상당히 유리하며, 1단과 2단 압축기의 압축비를 적절히 조절하여 시스템의 요구 사항에 맞는 시스템을 구성하는 것도 용이하다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 에너지 관리공단에서 지원받는 에너지·자원 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Seong-Ryong Park, 2008, "Development of Hybrid Heat Pump by Using Waste Heat," *KIER*, p. 30.
- (2) Jeong, S., Chae, K. H., Park, S. W., Park, S. and Kim, M. S., 2008, "Cycle Analysis of an Absorption/Compression Hybrid Heat Pump System," ISHPC conference, Seoul, p. 2.
- (3) Jeong, S., Yun, H. G., Park, K., Park, S. and Kim, M. S., 2009, "Performance Analysis of a Vapor Compression Heat Pump and a Hybrid Heat Pump using Ammonia/Water," The 3rd Korean Congress of Refrigeration, pp. 144~147.
- (4) EES32, F-Chart Software.
- (5) Kwan-Tack Jeon and Dong-Soo Jung, 2000, "Opimization Study of the Hybrid Cycle," Journal of SAREK 2000 Summer Annual Conference(III), p. 1091.
- (6) Groll, E. A. and Radermacher, R., 1993, "Vapor Compression Heat Pump With Solution Circuit And Desorber/Absorber Heat Exchange," International Absorption Heat Pump Conference31, pp. 463~469.