

사이클 해석을 통한 GHP 성능 예측

차우호^{*†} · 최 송^{*} · 정백영^{*} · 김병순^{*} · 전시문^{*}

* LG 전자 HAE 연구센터 AE 연구소

Prediction of GHP Performance Using Cycle Analysis

Woo Ho Cha^{*†}, Song Choi^{*}, Baik Young Chung^{*}, Byung Soon Kim^{*} and Si Moon Jeon^{*}

* AE Laboratory, HAE R&D Center, LG Electronics

(Received November 19, 2014; Revised December 2, 2014; Accepted December 2, 2014)

Key Words: GHP(가스 엔진 히트 펌프), EHP(전기 구동 히트 펌프), Engine(엔진), Compressor(압축기) Simulation(시뮬레이션), COP(성적 계수), R410A

초록: 가스 엔진 히트 펌프는 가스 엔진의 축동력으로 압축기를 구동하는 시스템으로 전력을 거의 사용하지 않고, 엔진 폐열을 활용하기 때문에 하절기와 동절기에 전력 Peak 를 억제하는 공조기로 주목을 받고 있는 제품이다. 제품 개발 시 시스템 성능 예측이 중요하므로 이를 위해 초기 설정한 운전점에서 열교환기 및 압축기의 특성을 반영하여 반복 계산을 수행하면 최종적인 운전점을 도출할 수 있고, 가스 엔진의 성능 데이터를 활용하면 가스 엔진 히트 펌프의 정확한 효율을 예측할 수 있다. 난방 성능을 예측할 때에는 엔진 폐열이 시스템에 공급되기 때문에 외부 열을 흡입하는 구간과 엔진 폐열을 흡입하는 구간을 동시에 고려해야 예측의 정확도를 높일 수 있다. 25 마력 가스 엔진 히트 펌프의 성능을 예측한 값은 실제 측정된 값과 비교하였을 경우 5% 정도의 오차가 발생하며 향후 성능 예측 모델을 구성되는 부품 특성을 반영하면 오차의 폭이 감소될 것으로 예상된다.

Abstract: In this paper a prediction method of GHP performance is proposed for increasing design accuracy. Two compressors with different capacity and 2311cc gas engine are used for prediction and the target capacity of GHP is 25HP. For predicting GHP performance at first the operation points are randomly selected and then as compared with compressor performance data and heat exchanger characteristic, more accurate operating points are decided through recursive calculation. Lastly engine performance data is used for calculating gas consumption volume. Predicting heating mode performance of GHP, evaporator is separated to the two section of absorbing heat in outdoor air and in engine. From the experimental results, it was found that the simulation model is good for the predicting GHP efficiency and the difference of predicted and measured efficiency is less than 5%

1. 서 론

1.1 연구 배경

일반적으로 에어컨으로 명칭되는 EHP(Electric Heat Pump)는 1 차 에너지(LNG)를 발전소에서 변환하여 고급 에너지인 전기로 운전하는 시스템이지만 GHP(Gas Engine Driven Heat Pump)는 1 차 에너지인 LNG 또는 LPG 로 가스 엔진을 구동하여 도출된 축동력으로 압축기를 운전하는 시스템이다. 따라서 GHP 는 에너지의 변환 시설이 필요 없기 때문에 에너지의 활용에서 우수한 기능을 가지고 있다. 이와는 별도로 EHP 는 동절기에 외기 온도가 저하되면 능력과 공기 토출 온도가 감소하고, 제상 운전 시 찬 공기가 토출되어 쾌적성이 저하되는 문제가 있다. 반면 Fig. 1 에 표시된 것과 같이 GHP 는 외부 열과 함께 엔진의 폐열을 동시에 활용할 수 있어서 EHP 보다 우수한 난방 성능을 나타낸다. 그러므로 겨울철에 한랭지성

† Corresponding Author, E-mail: wooho.cha@lge.com

기후를 나타내는 우리나라의 경우, GHP 시스템이 가스 냉방으로써 가지는 장점 이외에도 혹한에서도 난방 성능이 우수한 공조기로서 크게 각광을 받아 2000 년 초부터 일본 제품의 보급이 활발히 이루어지고 있으며 국내에서도 여러 기관에서 관련된 기초 연구 개발이 수행되었다. 그러나 기술적인 문제로 제품으로 출시되지 못하였으나 LG 전자가 2006 년도에 R22 냉매를 사용하는 제품의 상용화에 성공하였고, 지속적인 연구 개발을 수행하여 현재는 R410A 냉매를 사용하는 GHP 제품을 상용화하고 있다.

1.2 선행 연구

GHP는 일본에서 1980 년 초부터 선행 연구를 시작하여 제품으로 개발한 것으로 국내에서는 2000 년도 초부터 GHP를 소개하거나 기초 연구를 수행한 내용을 중심으로 논문이 발표되었다. 2000 년도 초에 김⁽¹⁾등은 상용 프로그램을 이용하여 R407C 냉매를 사용하는 GHP 사이클 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하여 엔진 폐열을 효과적으로 이용하는 방법을 제시하였지만 사이클 시뮬레이션에 사용된 인자들을 실험으로 검증하지는 못하였다. 부품 설계에 대한 기술 개발도 진행되었으며 채⁽²⁾등은 엔진의 폐열 회수용 열교환기 특성에 대한 연구를 진행하여 배기가스 열전달 계수를 향상하기 위해서 배기가스 온도를 높이고, 냉각수 온도를 낮추며 배기가스와 냉각수 유량이 증가시키는 것이 좋다는 것을 증명하였고, 또한 Shell-plate 열교환기의 배기가스 측 열전달 상관식을 도출하였다. 한⁽³⁾은 GHP의 국산화 개발 관련된 연구를 진행하였고, 이를 기반으로 손⁽⁴⁾등은 R22 냉매를 사용한 20HP GHP에 8 대의 실내기를 부착한 시스템에 대한 실증 실험을 수행하여 부하에 따른 엔진 속도의 제어에 대한 연구를 진행하였다. GHP에 대한 국내 연구 이외에도 일본 GHP 제품의 기술 개발을 소개하는 논문이 국내에 발표되었으며 요시미⁽⁵⁾는 Aisin의 GHP에 용량 가변 압축기, 용량 조절 밸브를 적용한 시스템의 설계 및 성능 측정에 관한 논문을 발표하였다.

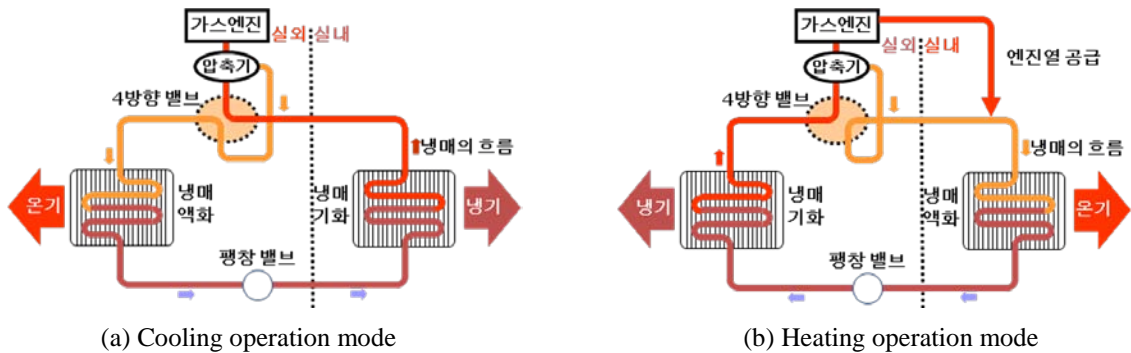


Fig. 1 Schematic diagram of operation mode

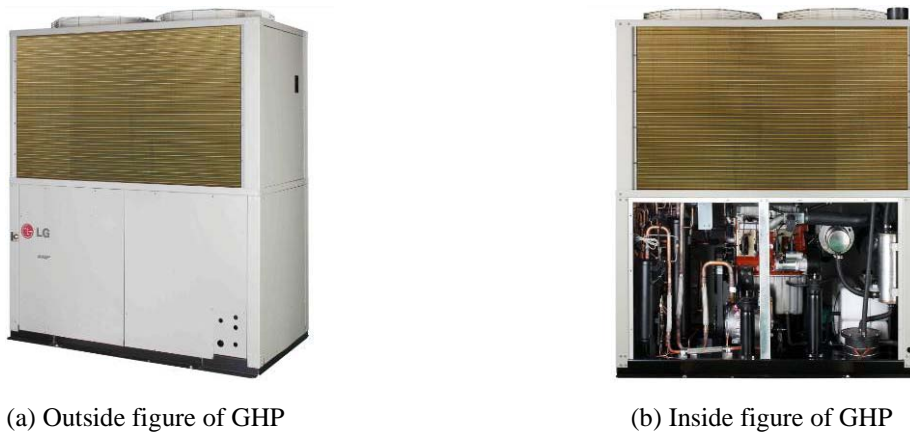


Fig. 2 Figure of LG GHP Super

Table 1 Gas engine specification of GHP

엔진 타입	엔진 용량	압축비	정격 출력	최대 토크	회전 방향
4 기통	2311cc	14.8:1	40.7ps	13.7kgf·m	CCW(Seen from Flywheel)

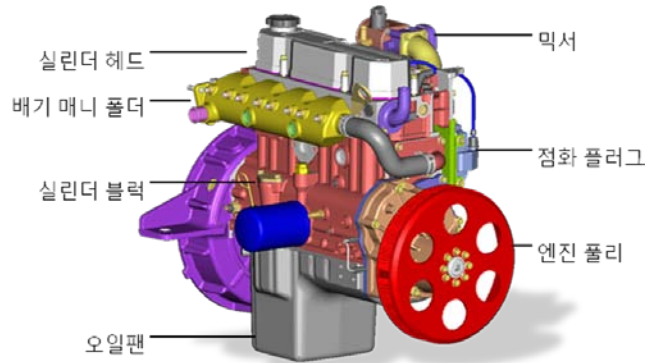


Fig. 3 Shape of gas engine for GHP

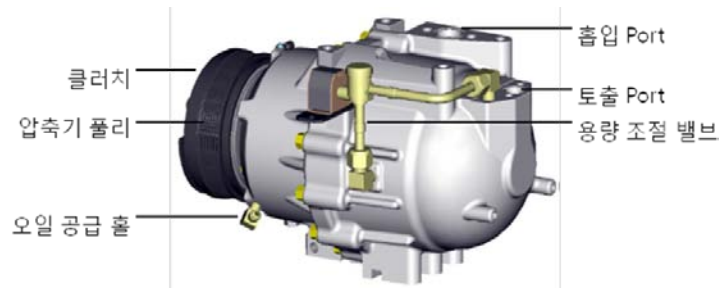


Fig. 4 Shape of compressor for GHP

본 논문에서는 Fig. 2 에 나타나 있는 R410A 냉매를 사용하는 LG 전자 GHP 시스템의 주요 부품을 소개하고, 사이클 해석을 활용하여 GHP 의 성능을 예측한 방법과 GHP 를 실제 제작하여 실증한 내용을 중심으로 기술하였다.

2. GHP 시스템의 주요 부품

2.1 엔진

본 연구에서 사용된 GHP 의 엔진은 Fig. 3 에 표시되어 있다. GHP 엔진이 구동되는 과정은 제로 가버너를 통과한 연료가 믹서에서 공기와 혼합된 후 엔진으로 유입된 후 실린더 블록 내부에서 폭발 과정을 거치면서 엔진 폴리를 회전시킴으로 압축기에 동력을 전달하게 된다. 연소가 완료된 배기가스는 외부로 배출되기 전에 배기 매니폴더를 지나면서 냉각수와 열교환하게 된다.

엔진의 최대 출력은 압축기의 전체 운전 상태를 고려하여 압축기의 운전 출력보다 높게 설계해야 하고, 이를 반영한 엔진의 사양이 Table 1 에 표시되어 있다.

2.2 압축기

본 연구에서 사용된 압축기는 개방형 스크롤 압축기로 Fig. 4 에 표시되어 있다. 압축기는 회전수가 변경되는 가변 압축기로, 압축기에 부착된 용량 조절 밸브를 활용하면 토출되는 냉매를 흡입 측으로 재순환시키기 때문에 회전수 변경에 따른 용량 조절보다 더 넓은 범위의 용량 조절이 가능하다.

Table 2 Compressor specification of GHP

	10 마력	15 마력
Volume[cc/rev]	85	120
Max Speed [rpm]	6200	5400
Diameter[mm]	Dia 190	Dia 190
Clutch Pulley[mm]	Dia 143	Dia 143
Rotation direction(from Clutch side)	CW	CW

GHP 엔진에서 압축기로 동력 전달은 엔진 풀리와 압축기 풀리에 연결되는 벨트를 통해 이루어지고, 이 때 압축기 풀리의 전단에 부착된 클러치를 활용해서 압축기의 구동여부를 결정할 수 있다. 즉 클러치가 압축기 풀리에 부착되면 압축기 내부의 스크롤이 회전하면서 냉매를 고온 고압의 가스로 변화시키게 되고, 반대로 클러치가 압축기 풀리에 부착되지 않으면 압축기 풀리만 회전하고, 내부의 스크롤은 동작하지 않으므로 압축기가 정지된 효과를 갖게 된다.

Table 2 에는 압축기 사양이 정리되어 있으며 본 연구에서는 10 마력과 15 마력 압축기를 병렬로 연결하여 25 마력으로 구성된 시스템을 사용하였다. Table 2 에 표시된 10 마력 압축기와 15 마력 압축기는 동일한 외형 크기를 가지고 있으나 내부 체적은 각각 85cc, 125cc 로 다르며 압축기의 회전 방향은 클러치를 보는 방향에서 시계 방향으로 엔진과 압축기를 동력을 전달하기 위하여 벨트로 결합할 때에는 각각의 회전 방향을 일치시켜야 한다

3. GHP 사이클 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법

25 마력 GHP 의 제작 및 성능 측정을 위해서 먼저 주요 부품을 설계한 후, 시스템을 구성하였을 때 도출 가능한 성능을 예측하기 위하여 사이클 시뮬레이션을 수행하였다. 사이클 시뮬레이션은 초기에 임의의 운전점에서 계산 후에 산출된 값을 압축기, 엔진의 성능 데이터와 비교하여 반복 계산을 수행하였으며 산출 값과 성능 데이터가 수렴하는 사이클의 최종 운전점을 결정하여 성능을 예측하였다.

엔진의 성능 데이터는 엔진을 운전하기 위하여 필요한 연료량과 점화시기, 연료량을 결정하는 기본 데이터로, 부가적으로 엔진의 토크와 연료량에 대한 데이터가 생성되기 때문에 압축기의 운전에 필요한 토크를 알게 되면 엔진에서 소모되는 연료량도 유추할 수 있으므로 예측 정확도를 높일 수가 있다.

본 연구에서 논의되는 GHP 는 용량이 25 마력이므로 압축기의 성능 데이터는 10 마력과 15 마력 압축기의 성능 데이터를 모두 활용하였으며, 시스템의 운전점을 변경하면 압축기의 능력과 필요 동력, 냉매 순환량이 예측되는 데이터로 활용하였다.

증발기와 응축기를 활용하여 응축 온도, 증발 온도를 예측하기 위해 열전달 기본 값이 반영된 ε -NTU 방법을 활용하였으며 냉매의 특성값은 NIST 의 Refprop 을 사용하여 계산하였다.

3.2 성능 예측

냉방과 난방의 성능 예측을 하는 과정은 유사하기 때문에 냉방 성능 예측을 중심으로 기술하였다. 냉방 성능 예측을 위해서 먼저 임의로 응축 온도, 증발 온도, 과열도, 과냉도를 선정한 후에 하기의 단계별로 진행하였으며 각 단계의 관련된 식들도 표시하였다.

- 1 단계: 증발 온도와 과열도를 이용하여 압축기의 흡입 엔탈피, 엔트로피를 도출
- 2 단계: 압축기의 단열 효율을 이용하여 실제 도출 엔탈피를 도출
- 3 단계: 응축기 출구 엔탈피와 증발기의 입구 엔탈피는 동일하다는 가정으로부터 도출
- 4 단계: 목표 COP 를 달성하기 위한 증발기 능력으로부터 증발기의 입구 엔탈피를 도출

5 단계: 냉매 순환 유량은 냉방 능력을 달성하기 위해 증발기 엔탈피 차를 이용하여 도출

$$h_{suc} = f(\text{압력, 온도}) \quad S_{suc} = f(\text{압력, 온도}) \quad (1)$$

$$h_{dis} = \frac{(h_{dis_s} - h_{suc})}{\eta_s} + h_{suc} \quad (2)$$

$$h_{eva} = h_{cond} \quad (3)$$

$$h_{eva} = h_{suc} - COP \times \text{압축기 } \Delta h = h_{suc} - COP \times (h_{dis} - h_{suc}) \quad (4)$$

$$\dot{m} = \frac{\text{증발능력}}{\text{증발} \Delta h} = \frac{71kW}{h_{suc} - h_{eva}} \quad (5)$$

(1)부터 (5)번 식에서 사용된 각각의 수식 기호의 의미는 하기와 같이 정리하였고,

h_{suc} : 압축기 흡입 엔탈피, h_{dis} : 압축기 토출 엔탈피, h_{dis_s} : 흡입과 동 엔트로피의 압축기 토출 엔탈피,
 h_{cond} : 응축기 토출 엔탈피, h_{eva} : 증발기 흡입 엔탈피, S_{suc} : 압축기 흡입 엔트로피, η_s : 압축기 단열 효율,
 \dot{m} : 냉매 질량 유량, COP (Coefficient of Performance): 정격 성능 계수를 나타낸다.

각 단계를 거치면서 도출된 냉매 순환 유량으로 증발 온도와 응축 온도를 새로 산출하는 반복 계산을 수행하였고, 응축 온도와 증발 온도가 수렴하는 운전점에서 시스템의 능력을 계산한 값과 압축기의 성능 데이터가 차이가 없으면 최종 운전점으로 확정하였다. 4 단계에서 COP를 결정할 때에는 엔진 성능 데이터를 반영하여 정확한 효율의 계산이 가능하였다. 주목할 것은 COP를 계산할 때 EHP보다 3배 정도 낮게 되는데 이는 엔진 효율이 30% 정도이기 때문에 EHP 대비 3.3배의 투입 에너지가 증가하게 되고, 정확한 비교를 위해서는 EHP에 투입되는 전기 에너지를 계산할 때 발전과 송전 효율을 고려해야 한다. 예를 들면 COP가 4.0인 25마력 EHP를 발전과 송전 효율을 30%로 하여 계산하면 COP가 1.2로 감소한다. 난방 성능 예측은 냉방 성능 예측과 유사하게 진행하였다.

3.3 실외 열교환기 용량 계산

냉방 운전에서 실외 열교환기의 용량은 응축 용량과 동일하지만 난방 운전에서는 엔진 폐열을 시스템에 공급하는 열교환기가 추가의 증발기 역할을 하게 되므로 실외 열교환기가 담당해야 하는 증발 능력은 감소하게 된다. Fig. 5에는 이에 대한 개념이 표시되어 있으며 (6)의 난방 COP를 계산하는 식을 통해서도 알 수 있다. 이와는 별도로 Fig. 5에서 엔진의 냉각수 온도는 대기 온도보다 높아서 증발 온도를 상승시킬 수가 있기 때문에 외기 온도가 0°C보다 낮은 조건에서도 GHP의 난방 성능을 향상시킬 수 있다.

$$\text{난방 COP} = \frac{h_{dis} - h_{cond}}{h_{dis} - h_{suc}} = 1 + \frac{(h_{suc} - h_{mid}) + (h_{mid} - h_{eva})}{h_{dis} - h_{suc}} = 1 + \frac{\text{공랭식 증발 } \Delta h + \text{엔진배열 증발 } \Delta h}{\text{압축 } \Delta h} \quad (6)$$

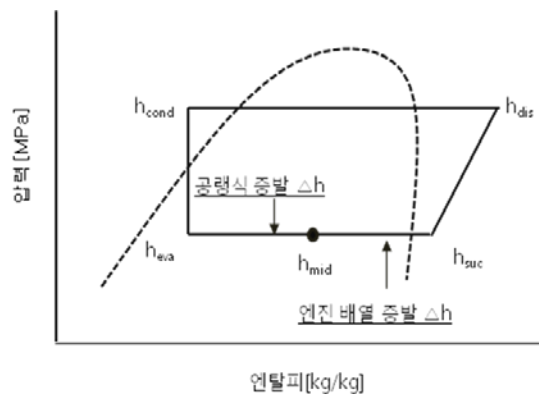


Fig. 5 Mollier diagram in heating operation mode of GHP

식 (7)에서 h_{mid} 는 공랭식 증발기의 출구 엔탈피 또는 엔진 폐열 증발기의 입구 엔탈피를 나타낸다.

4. 성능 예측 및 측정 결과

앞에서 언급한 성능 예측의 방법으로 냉방 및 난방의 운전점을 도출하여 Fig. 6 에 도식하였다. 성능 예측 방법으로 운전점 및 각 운전점에서 엔탈피를 알 수 있기 때문에 GHP 시스템을 구성하는 각 부품의 용량을 간단하게 도출할 수 있다. 전반적으로 냉방의 실내 및 실외 온도가 난방보다 높기 때문에 운전 구간은 난방보다 상부에 존재하며 운전 영역은 냉방이 난방보다 작으므로 더 많은 질량 유량이 필요하고, 이는 성능 예측 시 냉매 순환량이 냉방이 난방보다 20% 이상 더 많은 질량 유량이 필요한 것으로 확인할 수 있었다.

3.3 절에서 언급한 것과 같이 난방 운전에서 GHP 는 2 개의 증발기를 사용하기 때문에 성능 예측 모델에서 엔진 폐열 활용률에 따라 난방 COP 를 분석하면 폐열 사용이 증가할수록 COP 는 선형적으로 증가하고, 공랭식 증발기와 엔진 폐열 증발기의 용량비는 급격하게 감소하여 100% 폐열 활용 시에는 용량비가 0.9 로 엔진 폐열량이 공랭식 증발기 용량보다 크게 되며 이는 Fig. 7-(a)에 표시되어 있다. 이를 통해 엔진 폐열을 최대로 사용하는 것이 난방 COP 를 향상시킬 수 있는 중요한 방법임을 알 수 있다.

Fig. 7-(b)에서는 성능 예측 방법으로 도출된 냉방 및 난방의 효율과 GHP 시스템을 설치 후 측정한 냉방 및 난방 효율을 표시하였다. 성능 예측 방법의 효율은 실제 측정한 효율보다 5% 정도 높게 나타났다. 이는 성능 예측 방법은 배관 및 구성 부품에서의 압력 손실과 열교환기에서 Path 형상에 따른 영향을 고려하지 않았기 때문에 발생하는 오차로 이를 반영하였을 경우에는 예측의 정확도가 향상될 것으로 예상된다. Fig. 7 에 표시된 COP 는 측정 값을 기준으로 하여 예측 값과 비율로 표시하였다.

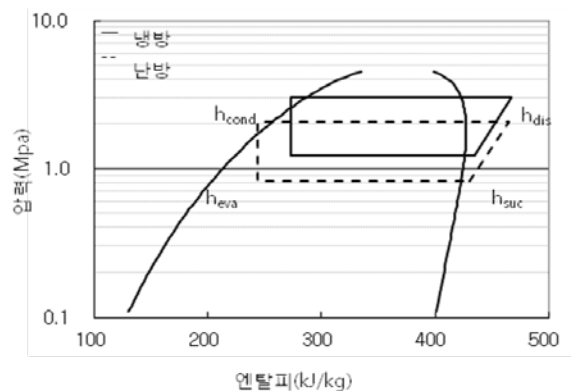
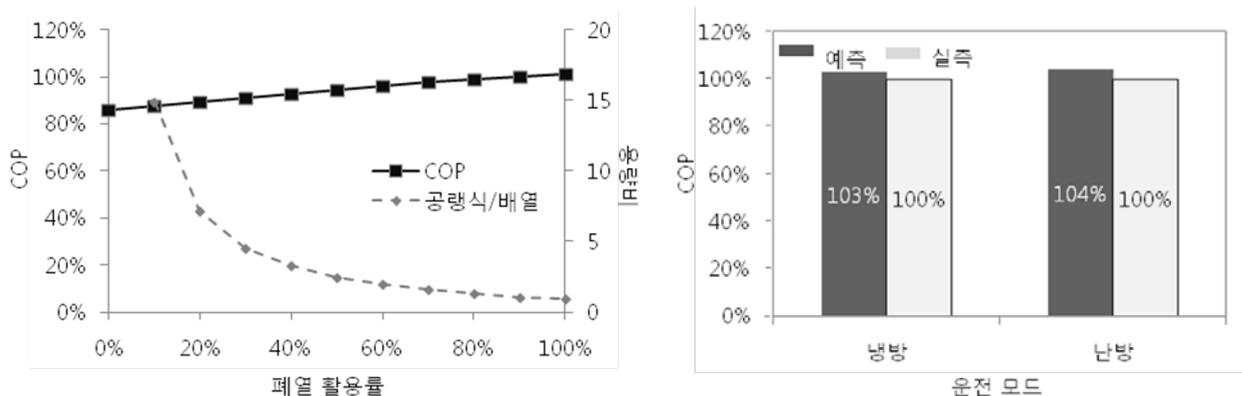


Fig. 6 Mollier diagram in cooling and heating mode of GHP



(a) Predicted COP as waste heat of engine in heating mode

(b) Predicted and measured COP

Fig. 7 Predicted and measured COP in operating state

5. 결 론

전력 Peak 의 대안으로 주목 받고 있는 가스 히트 펌프를 개발하기 위해서 부품의 특성을 고려한 성능의 예측이 중요하고, 이를 통해 제품의 설계 정확도와 품질을 높일 수 있다. 본 연구에서는 가스 엔진 히트 펌프 중 25 마력 제품의 성능을 시뮬레이션을 통해서 예측하여 실제 측정된 성능 값과 비교하였다. GHP 의 사이클 특성과 엔진과 압축기의 성능 데이터를 고려하여 성능 예측의 정확도를 높이는 과정을 수행하면서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) GHP 의 난방 운전시 엔진 폐열은 시스템에 공급되기 때문에 공랭식 증발기기 담당하는 증발 구간과 엔진 폐열이 담당하는 증발 구간을 구분하여 계산해야 정확한 값을 예측할 수 있다.

(2) GHP 의 엔진 폐열 활용률이 증가할수록 난방 COP 는 증가하고, 실외 열교환기의 설계 용량도 감소시킬 수 있기 때문에 엔진 폐열을 최대한 사용하도록 설계를 수행해야 한다.

(3) 성능 예측 모델을 활용하여 예측된 효율과 측정된 효율을 비교 시 5% 의 차이가 발생하며 향후에 부품의 압력 강하 및 특성을 고려하면 오차가 감소되어 더 정확한 성능을 예측할 수 있다.

참고문헌

(References)

- (1) Kim, O. J., Kim, Y. Y., Yeom, H. K., Park, Y. S., 2002, "Cycle Simulation for Gas Engine Heat Pump Using R407C", SAREK Summer Conference, pp. 835~840
- (2) Chae, K.-S., Yun, S.-K., Park, S.-R., Chang, K.-C., Kim, O. -J., "Heat Transfer Characteristics of the Plate-Shell Heat Exchanger for Exhaust Gas Waste Heat Recovery in the Gas Engine Driven Heat Pump," SAREK Winter Conference, pp. 229~234
- (3) Han, J. O., 2003, Magazine of the SAREK, "The Localization Development and Distribution of GHP," Vol. 32, No 3, pp. 31~35
- (4) Sohn, W.-S., Choi, K.-S., Chae, J.-M., Kwon, O.-B., 2003, "Performance Tests for 20HP Class GHP Using R22" SAREK Summer Conference, pp. 899~904
- (5) Kushiro, Y., 2003, Magazine of the SAREK, "The Development of High efficient GHP using Volume Variable Compressor," Vol. 32, No 3, pp. 27~30