

산업폐수열원이용 GHP 시스템 개발

장기창, 박준택, 박성룡
한국에너지기술연구원 미활용에너지연구팀

Development of GHP System Using Industrial Waste Water Source

K.C. Chang, J.T. Park, S.R. Park
Unutilized Energy Research Team, KIER

1. 서론

선진국에서는 산업체의 1차에너지소비가 전체 에너지소비의 약 30~40%이고, 이 에너지의 약 70~80%가 공정용 열에너지로 사용되고 있다. 이러한 공정용 열의 온도범위를 파악하는 것은 매우 중요하지만 산업공정의 다양성 때문에 평가하기에는 많은 어려움이 따른다. 그러나 일반적으로 산업체 열에너지의 60% 이상은 300℃ 이하의 온도이며, 약 20~30%는 150℃ 이하이다. 열펌프의 실제적인 상한치는 150℃ 이하이므로 총에너지수요의 약 4~10%가 산업분야에서 열펌프로 폐열회수 및 공정용 온수가열에 광범위하게 이용될 수 있다는 것이다.

유럽에서 산업용 열펌프의 산업분야 보급을 보면 낙농업과 양조업을 포함하여 56.8%가 식품산업에 보급되고 있고, 농업에 9.9%, 화공 및 정제에 5.4%, 제지 및 목재에 7.8%, 섬유 및 염색에 2.7%, 플라스틱 2.4% 그리고 기타 등에 15%를 차지하고 있다. 특히 식품산업에서 열펌프의 경제성이 우수하여 널리 보급된 것이 아니라 일찍부터 이러한 분야에 열펌프의 적용이 시작되어 보급율이 높아진 것이다.

열펌프는 저온의 열원으로부터 열을 흡수하여 보다 높은 온도로 승온하여 이용하는 장치인데, 섬유, 염색, 화학공장 등 산업공정에서 대량으로 버려지고 있는 40~50℃의 저온 폐수열은 열펌프의 열원으로 매우 이상적이다. 산업폐수를 열원으로 사용하는 열펌프의 구동을 압축식에서 가스구동으로 할 경우, 산업폐수로부터 80% 정도, 축동력의 30~35%, 엔진냉각수에서 30% 그리고 배기가스로부터 15% 정도의 열을 총합적으로 회수할 수 있어서 온수제조시 보일러의 효율대비 1.4~2.2배 정도의 높은 효율을 낼 수 있다. 따라서 에너지절약효과가 매우 큰 시스템이라 할 수 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 40~50℃의 산업폐수열을 이용하여, 열펌프의 응축기에서 온수 승온폭을 10℃, 엔진배가스 열교환기에서 2℃ 그리고 엔진냉각수에서 3℃의 승온폭을 가지므로 55℃의 온수를 70℃로 승온시켜 산업공정에 활용하는 시스템이다.

특히 섬유 및 염색업체에서 대량으로 배출되고 있는 40~50℃의 폐수열을 가스엔진구동 열펌프(GHP)시스템으로 온수를 제조하여 공정에 재이용할 경우 경제성이 매우 양호한 것으로 평가되고 있다. 그리고 전기구동 열펌프의 경우 발전-송전-이용에 많은 손실이 발생하여 총에너지 이용효율이 떨어지나 천연가스를 이용한 열펌프의 경우 이러한 에너지 변환시의 효율손실이 적어 국가 전체적 에너지절약에 기여할 수가 있다. 따라서 산업공정에서 전기에너지의 의존도를 줄임으로 전력수급체계의 개선과 에너지원의 다변화로 산업체의 에너지가

격 경쟁력의 강화와 하절기 산업폐열의 고온 방류를 억제함으로써 환경의 개선효과 및 기업체의 환경부담금 문제해결이라는 부가적인 이득이 발생된다.

따라서 산업폐열을 회수하여 산업공정에 공급할 수 있는 GHP시스템이 국내에서는 아직 초보적인 연구단계이므로 이에 대한 기술 개발을 통하여 실용화될 수 있도록 GHP시스템의 에너지이용 열공급기술과 관련된 열의 회수, 송온, 제어 등 핵심요소기술 개발과 최적시스템 설계기술을 확보하고 모델플랜트의 실증화를 통하여 널리 확대보급할 계획이다.

2. GHP 시스템의 특징

압축기의 구동용으로는 일반적으로 Fig. 1과 같이 전기구동 열펌프(Electric Heat Pump, EHP)와 가스엔진구동 열펌프(Gas Engine Driven Heat Pump, GHP)가 많이 사용되고 있다. 가스엔진구동 열펌프는 냉매를 압축하기 위한 압축기를 구동하는 전기식 모터 대신 가스엔진으로 구동하는 열펌프 시스템으로서 작동원리는 압축기를 가스엔진으로 구동하는 것을 제외하고는 전기구동 압축식 열펌프의 작동원리와 거의 같다. 가스엔진의 배열은 배기가스열과 엔진자켓내의 냉각수의 열이 있으며, 이의 열을 열펌프에 의해서 송온된 온수를 더 높은 온도로 송온시킬 수 있도록 하는 것이다. 이와 같이 가스엔진구동 열펌프는 천연가스나 LPG 등 1차에너지를 직접 이용할 수 있어서 계약전력의 감소, 난방능력의 증대 등의 장점을 가지고 있으며, 천연가스의 이용촉진과 여름철 피크 전력억제 등 국가 에너지 정책상 개발이 기대된다. 특히, 엔진의 냉각수 배열과 배기가스열을 회수이용할 수가 있어서 전체 효율을 향상시킬 수 있으며, 엔진의 회전수를 제어하여 부하특성을 대응함으로써 부분부하 특성을 개선할 수 있다.

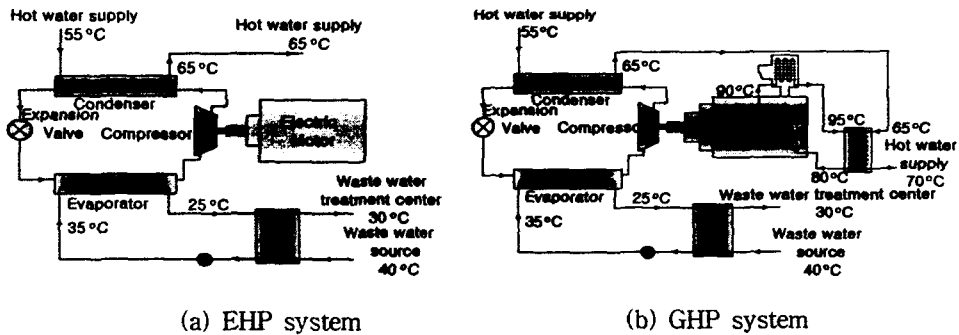


Fig. 1 Heat pump system

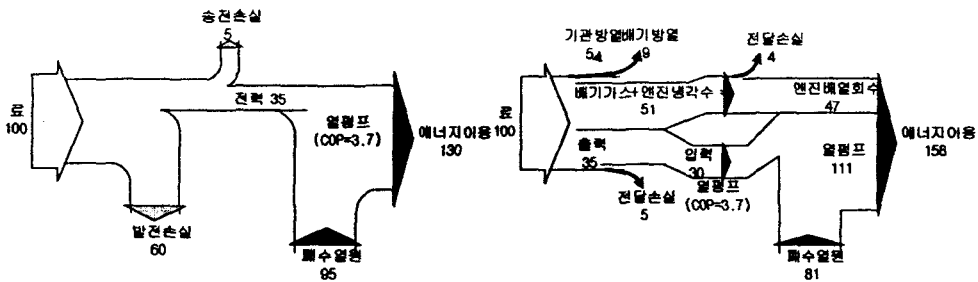


Fig. 2 Primary energy efficiency of heat pump system

Fig. 2는 가스엔진구동 열펌프와 전기구동 열펌프의 에너지 이용효율을 비교하여 나타낸 것으로서 전기구동 열펌프의 1차에너지 이용효율(PER)이 130%인데 비하여 가스엔진구동 열펌프는 가스엔진의 배열을 이용할 수가 있기 때문에 1차에너지 이용효율을 158%까지 올릴 수가 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 전기구동 열펌프에서 온수온도를 65℃까지 승온시킬 수가 있지만 가스엔진구동 열펌프에서는 65℃까지 승온된 온수를 엔진배열 열교환기를 거쳐게 함으로써 70℃까지 승온시킬 수가 있다.

3. GHP 시스템의 구성

가스엔진구동 열펌프 시스템의 주요구성은 Fig. 1(b)와 같이 가스엔진, 엔진배열회수장치 및 압축식 열펌프로 되어 있다. 본 연구개발의 시제품은 25HP급으로서 주요 구성요소에 대한 특징을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 가스엔진

25HP급 GHP시스템의 압축기 구동용 가스엔진은 V6 3.0 Liter 엔진을 기본으로 하여 LNG연료 공급시스템을 개선하고, 엔진본체, 연료공급계, 흡배기계, 냉각계, 윤활계, 엔진 제어계통으로 구성하고, 연료 시스템은 LNG가스 Pipe, Gas Pressure Regulator, Mixer, Over-Flow Valve, Engine Control Unit(ECU) 등으로 되어 있다. 연료 공급시스템은 ECU에 의해 엔진에 필요한 적절한 양의 연료를 계속하여 공급하고 잉여된 연료는 Return시켜 주도록 하였으며, LNG를 연료로 하는 엔진이므로 연료량을 제어하는 전용 Mixer를 장착하고, LNG 연료는 저압(0.01~0.02bar)상태로 사용되는 폭발성 Gas이므로 내압재료의 연료배관을 기밀 유지시키도록 하였다. 엔진의 흡기계통은 Air Cleaner Filter, Air Flow Sensor, Mixer, 흡기 매니폴드, 흡기 Valve의 경로로 연소실에 공급되며, 흡입압축 폭발이 끝난 배기가스는 배기 매니폴드, O₂ Sensor, 배기가스 열교환기, Catalytic Converter, Muffler를 통해 배출되도록 하였다.

기존의 사용연료는 LPG로서 이를 LNG연료 공급시스템을 개선하여 가스엔진(50HP/2000rpm)의 성능시험을 측정하였으며, 이때 엔진의 회전수는 900, 1200, 1500, 1800 및 2000rpm으로 하고 부하율은 각각에 대하여 25, 50, 75 및 100%로 하였을 때 축하중, 축 토크, 축출력, 배기가스온도 및 배기가스 성분을 측정 및 분석한 결과 엔진회전수를 2000 rpm으로 하고 부하율을 100%로 하였을 때 축출력은 56HP로 나타났으며, 열펌프 압축기의 정격회전수인 1800rpm으로 하고 부하율을 50%로 하였을 때 축출력이 25HP이므로 본 GHP 시스템에 적용할 가스엔진으로서는 적합함을 알 수 있었다.

3.2 엔진배열회수장치

3.2.1 배기다기관

GHP 시스템의 패키지내에 온도상승으로 인한 요소기기의 내구성 저하를 방지하기 위해서 외부방열이 가장 큰 배기다기관을 다음과 같이 이중관 열교환기로 구성하여 설치하였다.

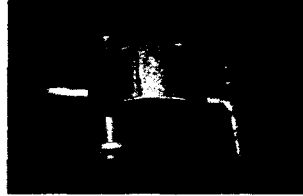
- 열교환량 : 4.4kW
- 배가스온도 : 620℃ -> 436℃
- 냉각수온도 : 83℃ -> 85℃
- 냉각수유량 : 2.0ton/h



3.2 배가스열교환기

GHP 시스템의 배가스열교환기는 고성능 콤팩트화를 위해 기존의 핀관형을 대체하여 shell-plate식으로 설계 및 제작하였으며, 설계기준은 다음과 같다.

- 열교환량 : 6.9kW
- 배가스온도 : 436℃ → 95℃
- 냉각수온도 : 85℃ → 88.5℃
- 냉각수유량 : 2.0ton/h



3.3 압축식 열펌프시스템

본 시스템에서 사용냉매는 환경친화적인 냉매인 R-134a를 사용하였고, 이에 적합한 25HP 급 개방형 왕복동식 압축기(FKX50-775N(BOCK))를 적용하였고, 증발기의 용량은 82kW, 응축기의 용량은 100.7kW로서 판형으로 하고, 팽창밸브는 R-134a용 Thermostatic Expansion Valve와 Needle Valve를 부착하여 최적의 냉매유동량이 될 수 있도록 조절이 가능하게 하였으며, Fig. 3은 열펌프 사이클의 구성도를 나타내고 있다.

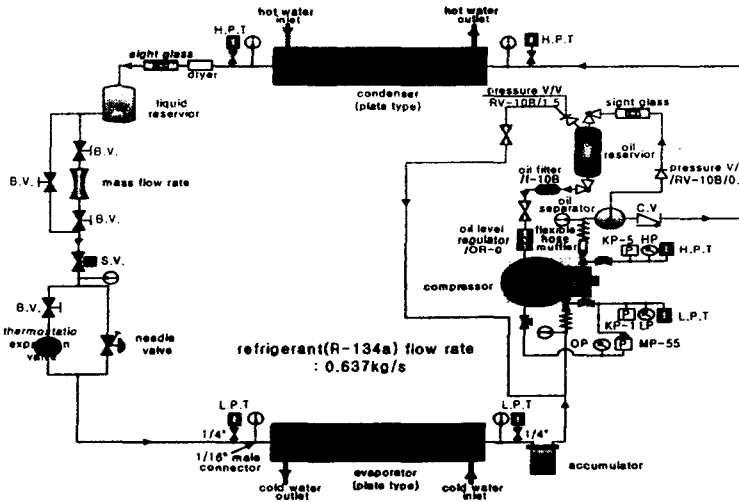


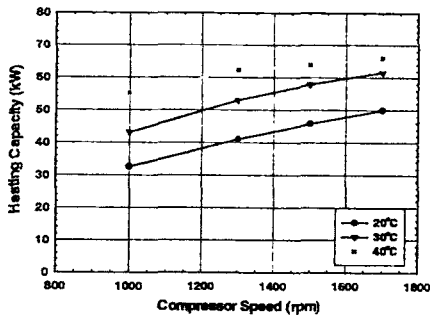
Fig. 3 Schematic of heat pump system

4. GHP 시스템 성능분석

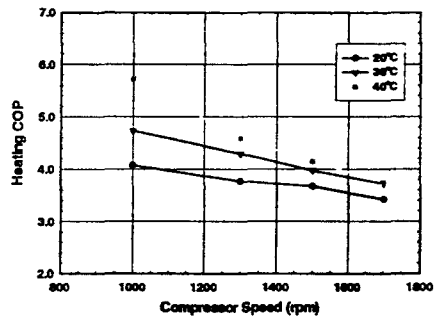
열펌프시스템의 부하율 변화에 대한 성능실험을 위해 25HP 압축식 열펌프시스템 시제품에 대한 성능실험장치를 구성하였고, 이때 압축기의 구동은 인버터를 사용하여 회전수를 조절하도록 하였다.

성능실험은 압축기 회전수 900, 1,300, 1,500, 1,700rpm으로 변화시켜서 부하율변화에 따른 열펌프시스템의 가열량 및 성적계수를 구하였다. Fig. 4는 응축기 입구온도를 50℃로 일정히 유지하고 증발기 입구온도를 20, 30, 40℃로 변화시켰을 때의 결과이고, Fig. 5는 증발기 입구온도를 30℃로 일정히 유지하고 응축기 입구온도를 45, 50, 55, 65℃로 변화시켰을 때의 결과를 나타내고 있다. 이때 가열량은 30~60kW 범위에서 운전되고, 소요동력은 7.8~18.4kW이며, 성적계수는 2.9~6.4 범위내로 운전되었음을 알 수 있다.

Fig 6은 가스엔진에서의 열회수량을 나타낸 것인데 엔진의 회전속도가 증가하면 부하량의 증가로 인한 폐열회수량도 증가하며, 이중에 엔진자켓에서의 회수량이 가장 크고 다음으로 배기다기관에서의 열회수량 그리고 배가스열교환기에서의 열회수량의 순으로 나타나고 있다. Fig. 7은 가스엔진의 배열회수율을 나타낸 것인데 투입에너지의 약 70% 정도를 회수하고 있으며, 이중에 엔진자켓에서는 약 36~41%, 배기다기관에서는 약 13~21% 그리고 배가스열교환기에서는 약 15~18% 정도 회수하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 엔진의 회전수 변화에 따른 열펌프와 엔진배열에서 얻는 열량을 나타낸 것인데 엔진의 회전수가 증가할수록 부하량도 크게 나타나고 있으며, 엔진회전수가 1800rpm에서 열펌프의 부하량은 약 64kW이고, 엔진의 배열회수량은 약 46kW 정도를 나타내고 있다

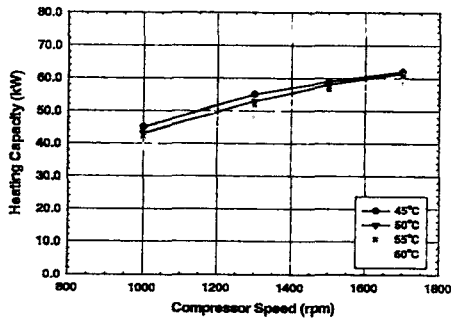


(a) Heating capacity

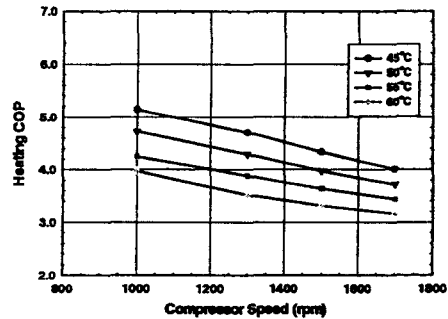


(b) COP

Fig. 4 Variation of heating capacity and COP depending on rpm and evaporator inlet temp.



(a) Heating capacity



(b) COP

Fig. 5 Variation of heating capacity and COP depending on rpm and condenser inlet temp.

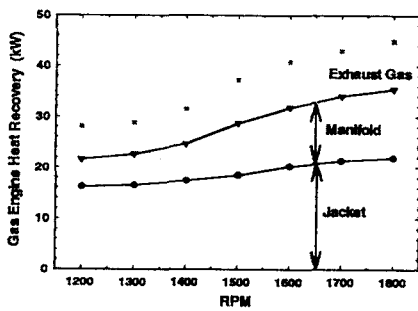


Fig. 6 Gas engine heat recovery depending on engine rpm

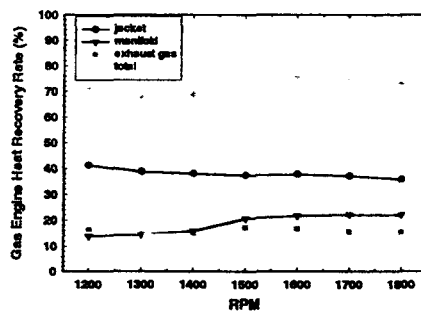


Fig. 7 Gas engine heat recovery rate depending on engine rpm

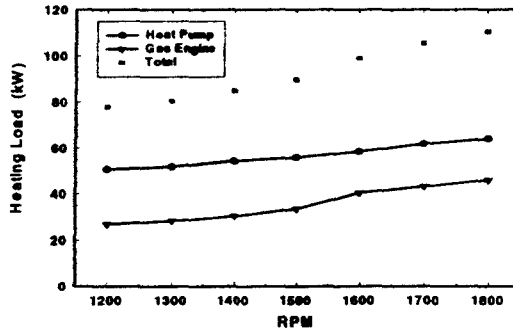


Fig. 8 Heating load depending on engine rpm

5. 결 론

산업체에서 다량으로 방출되고 있는 50℃ 이하의 저온 산업폐수열을 회수이용하기 위한 GHP 시스템의 시제품 성능평가에 대한 분석결과는 다음과 같다.

1) 가스엔진구동 열펌프와 전기구동 열펌프의 에너지 이용효율을 비교하면 전기구동 열펌프의 1차에너지 이용효율(PER)이 130%인데 비하여 가스엔진구동 열펌프는 가스엔진의 배열을 이용할 수가 있기 때문에 1차에너지 이용효율을 158%까지 올릴 수가 있고, 엔진배열을 이용하므로 70℃ 이상의 온수를 생산할 수 있는 장점을 갖고 있다.

2) 25HP급 열펌프시스템의 증발기 입구온도를 20, 30, 40℃로 하고 응축기 입구온도를 45, 50, 55, 65℃로 변화시켰을 때 가열량은 30~60kW 범위에서 운전되고, 소요동력은 7.8~18.4kW이며, 성적계수는 2.9~6.4 범위내로 운전되었다.

3) 가스엔진에서의 열회수량 엔진자켓에서의 회수량이 가장 크고 다음으로 배기다기관에서의 열회수량 그리고 배가스열교환기에서의 열회수량의 순으로 나타났다.

4) 가스엔진의 배열회수율은 투입에너지의 약 70% 정도이며, 이중에 엔진자켓에서는 약 36~41%, 배기다기관에서는 약 13~21% 그리고 배가스열교환기에서는 약 15~18% 정도 회수되고 있다.

5) 엔진회전수가 1800rpm에서 열펌프의 부하량은 약 64kW이고, 엔진의 배열회수량은 약 46kW 정도를 나타내고 있다

참 고 문 헌

1. 박준택외 12인, "염색폐수열 이용사업 타당성 조사", 대구광역시, 2000.
2. 박성룡외, "폐수온도의 변화에 따른 열펌프시스템성능평가", 온실가스저감심포지움, 2001.
3. R. M. Lazzarin, "Heat Pumps in Industry-Equipment", Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 14, No. 6, pp.581-597, 1994.
4. 高田秋一, "工業用 ヒートポンプ", 省エネルギーセンター, 1984.
5. Hedrick, R.L., Bassett, W.W., Cornell, T.L., "Performance Characterization of an Engine-Driven GHP in a Single-Family Residence", ASHRAE Trans., Vol. 99, Part 1, 1993.
6. Kazuta, H., "Development of Small Gas Engine Heat Pumps", ASHRAE Transactions, CH-89-16-2.
7. Yokoyama, T., "Design Considerations for Gas-Engine Heat Pumps", ASHRAE Transactions, AN-92-10-1.