

지열원 열펌프 시스템의 엑서지 분석

박 차 식

호서대학교 자동차공학과

1. 서론

전 세계적으로 화석연료 사용의 증가에 따른 이산화탄소 및 공해물질 배출로 인하여 지구온난화와 환경오염이 큰 문제로 대두되고 있다. 따라서, 국제적인 환경규제인 기후변화협약에 의해 온실가스 배출량에 대한 규제를 받게 되었고, 온실가스 감축의무를 만족하기 위해 이산화탄소 배출량 저감을 위한 각국의 연구 개발 노력이 절실히 요구되고 있는 시점이다. 최근에는 국제유가의 지속적인 상승으로 에너지 비용이 증가하여 에너지 절약적인 시스템에 대한 적극적인 기술개발이 필요한 실정이다. 우리가 사용하는 에너지의 대부분은 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료로 총 에너지원의 85%를 넘는다. 그러나 그 양이 한정되어 있고 사용량의 증가에 따라 환경문제를 야기하고 있어 신재생에너지 분야에 대한 관심이 집중되고 있다. 신재생에너지는 석유, 석탄, 원자력 또는 천연가스가 아닌 에너지로서 재생에너지는 태양광, 태양열, 풍력, 지열, 소수력, 해양에너지, 폐기물 에너지, 바이오매스의 8개 분야와 신에너지 연료 전지, 수소에너지, 그리고 석탄액화가스 3개 분야로 정의되어 진다. 이 가운데 지열은 에너지 절감 효과가 확실하고 시스템의 신뢰성이 높아 그 수요가 점차로 증가하고 있다.

지금까지 지열은 미국 및 캐나다 그리고 북유럽

국가 등에서 지열원 시스템에 대하여 활발한 연구와 보급이 이루어져 왔다. 수치적으로는 2000년 기준으로 약 50만대가 설치되었고, 연간 10% 이상의 성장세를 보이고 있다. 용량으로 환산하면 26개국에 6,850 MW 정도로 추산되고 있다. 지열은 심부지열은 높은 온도를 직접 이용하여 난방이나 발전에 이용하는 방식과 지표면에서 200m 이내의 천부지열을 이용하여 열펌프를 구동하는 방식이 있다. 일반적으로 지열원 열펌프 시스템은 공기열원 열펌프 시스템에 비하여 외기의 급격한 변화에도 영향을 받지 않고 일정하게 온도를 유지하는 지열을 활용하기 때문에 시스템 효율이 높다. 또한, 기존의 냉난방 시스템과 비교할 때 수명이 길고 소음이 적고, 냉난방에 사용되는 에너지 운전 비용과 유지보수 비용이 적어 경제적 측면에서 매우 효과적인 시스템이라고 할 수 있다. 그러나, 지중 열교환기 설치에 따른 전체 시스템의 초기 설치 비용이 기존 냉난방 설비에 비하여 큰 것이 단점이다. 따라서, 지열원 열펌프 시스템의 설치에 앞서 정확한 경제성 평가가 이루어지고 설치후에는 효율적인 운전으로 운전비를 절감하는 것이 반드시 필요하다. 여기서는, 천부지열과 열펌프로 구성된 시스템에 대하여 엑서지 해석이 포함된 열역학적 해석을 통하여 지열원 열펌프 시스템 구성기기의 성능 특성을 분석하였다. 엑서지 해석을 통해서 시스템 주요 구성 부품의 비가역성을 평가하여 시스템의 개선점에 대한 잠재력을 제시하고자 한다.

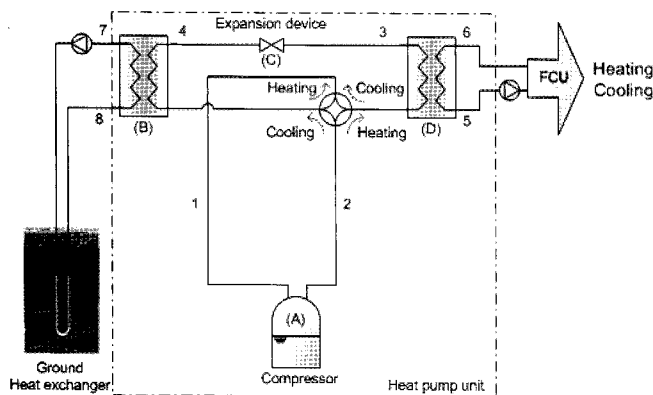
2. 지열 시스템 구성

지열 시스템을 해석하기 위한 시스템은 그림 1과 같이 구성하였다. 시스템은 다음과 같이 크게 세가지 루프로 구성되어 있다.

- I) 지중열교환기를 순환하는 부동액 순환 루프
- II) 냉매 순환 루프
- III) 건물의 냉방이나 난방을 위한 냉온수 순환 루프

지중 열교환기를 순환하는 작동유체는 동절기에 증발열원으로 사용시에 결빙을 막기 위하여 부동액을 주로 사용한다. 이상적인 순환 작동유체는 열전달 능력이 우수하고 점도가 낮아야 하며 지중 환경에 대한 영향이 없어야 한다. 또한, 가격이 저렴하면서 장기간 사용할 수 있어야 하고 각종 금속에 대한 내부식성을 갖추어야 한다.

열펌프 사이클을 구성하는 냉매 순환 루프는 압축기와 팽창장치, 그리고 2개의 열교환기(응축기와 증발기)로 구성되어 있고, 냉방과 난방 모드 전환을 위한 사방밸브가 설치되어 있다. 열펌프 사이클이 난방으로 작동할 때에는 지중열교환기가 지중열을 흡수를 하여 실내로 열을 공급하고, 냉방일 경우에는 실내의 열을 흡수하여 지중열교환기를 통해 지중으로 방출하도록 작동한다. 작동유체로는 냉매 R22를 사용하였다.



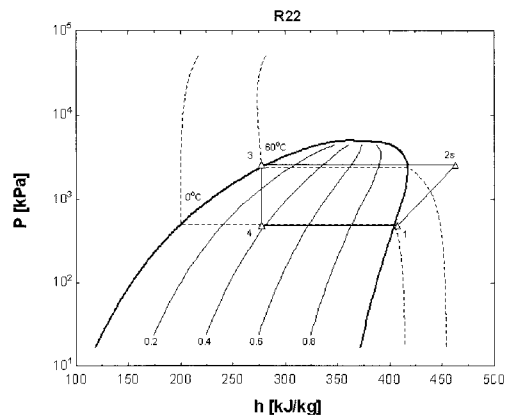
[그림 1] 지열원 열펌프 시스템 개략도

건물의 냉난방을 위한 실내 측 냉온수 분배장치는 기존의 냉난방 설비와 차이가 없다. 즉, 공기조화기, 팬 코일 유닛 등과 조합하여 사용할 수 있다. 최근에는 팬 코일 유닛 사용에 따른 물 배관의 부식이나 누수의 문제 그리고 개별실 제어의 어려움으로 실내에 직접 냉매를 공급하는 멀티시스템 에어컨 방식을 채택하기도 한다. 팬코일유닛 대신 실내기를 각 룸에 설치할 경우 실내 부하에 따라 냉매량을 제어하여 정확하면서도 신속하게 실내온도 제어가 가능하므로 쾌적한 공간을 유지할 수 있다.

그림 2는 지열원 열펌프 시스템 각 구성기기의 상태량을 P-h 선도에 나타내었다.

3. 시스템 해석

엑서지(exergy)는 질량을 가진 물질이 주어진 기준조건과 시스템에서 할 수 있는 유용한 일로 정의되어 지고 가용성(availability), 가용에너지(available energy), 유용에너지(utilizable energy) 등 다양한 표현으로 사용되어 진다. 냉동사이클에서 엑서지 해석은 공급된 에너지가 합리적으로 사용되었는지 혹은 어느 구성요소에서 가장 비효율적으로 사용되었는지를 분석하기 위하여 반드시 필요하다. 실제 냉동사이클에서 압축



[그림 2] 지열원 열펌프 P-h 선도

과정은 비가역적으로 이루어지고 압력손실이 있으며, 증발기와 응축기에서의 열전달이 발생하고 온도차에 의하여 비가역적으로 일어나고 일정량의 과냉과 과열을 하게 된다. 팽창장치에서는 급격한 압력강하에 따른 비가역성이 발생하게 된다. 이러한 사이클 특성을 고려한 엑서지 분석을 통하여 시스템을 구성하는 각 구성기기의 비가역성을 분석하고 개선 가능성을 검토할 수 있는 기본 자료로 활용할 수 있게 된다.

열역학적 해석을 바탕으로한 엑서지 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- (1) 사이클에서의 과정은 정상상태이며 운동에너지와 위치에너지는 무시한다.
- (2) 열은 시스템으로 전달될 때, 일은 시스템으로부터 발생될 때가 양의 방향으로 한다.
- (3) 배관에서의 압력강하 및 열전달은 무시한다.
- (4) 압축기의 등엔트로피 효율은 0.8로 가정한다.
- (5) 공기는 이상기체로 하고 비열은 일정한 것으로 가정한다.

지열원 열펌프 시스템의 열역학적 엑서지 해석을 위하여 필요한 지배방정식은 다음과 같다. 시스템을 구성하는 각 루프에서 질량보존의 법칙과 에너지 보존의 법칙을 만족해야 하므로, 식 (1)과 식 (2)와 같이 각각 나타낼 수 있다. 표 1과 표 2에서는 각 구성기기에 질량보존의 법칙과 에너지 보존의 법칙을 적용한 결과를 나타낸다. 여기서 하첨자 각 번호의 위치는 그림 1에 나타내었다. 하첨자 r은 열펌프를 순환하는 냉매를 나타내고, w와 wa는 팬코일유닛을 순환하는 온수와 지중 열교환기를 순환하는 부동액을 각각 나타낸다. 에너지 방정식에서 하첨자 2a는 등엔트로피 효율을 고려한 압축기 출구 상태를 나타낸다.

엑서지 균형식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 는 유동 엑서지로 정의되어지고, I는 비가역성을 나타낸다. 각 구성기기에 엑서지 균형식을 적용한 결과는 표 3에 나타내었다.

$$\sum m_i = \sum m_o \quad (1)$$

<표 1> Mass analysis

Components	Mass analysis using Eq. (1)
Compressor	$m_1 = m_2 = m_3$
Condenser	$m_1 = m_2 = m_r, m_5 = m_6 = m_w$
Expansion valve	$m_3 = m_4 = m_r$
Evaporator	$m_4 = m_1 = m_r$
FCU	$m_{air, i} = m_{air, o} = m_{air}$
Ground H/X	$m_7 = m_8 = m_{wa}$

<표 2> Energy analysis

Components	Mass analysis using Eq. (2)
Compressor	$W_{comp} = m_r(h_{2a} - h_1)$
Condenser	$Q_{cond} = m_r(h_{2a} - h_3), Q_{cond} = Q_{fc} = m_w C_{p, w}(T_{i, fc} - T_{o, fc})$
Expansion valve	$h_3 = h_4$
Evaporator	$Q_{evap} = m_r(h_1 - h_4), Q_{evap} = Q_{gh}$
FCU	$Q_{fc} = m_{air} C_{p, air}(T_{o, air} - T_{i, air})$
Ground H/X	$Q_{gh} = m_{w, a} C_{p, wa}(T_{o, wa} - T_{i, wa})$

<표 3> Exergy analysis

Components	Mass analysis using Eq. (3)
Compressor	$I_{comp} = m_r(\psi_1 - h_{2a}) + W_{comp} = T_0 m_r(s_1 - s_{2a})$
Condenser	$I_{cond} = m_r(\psi_{2a} - \psi_3) + m_w(\psi_6 - \psi_5) = T_0 [m_r(s_3 - s_2) + m_w(s_5 - s_6)]$
Expansion valve	$I_{exp} = m_r(\psi_3 - \psi_4) = T_0 m_r(s_4 - s_3)$
Evaporator	$I_{evap} = m_r(\psi_4 - \psi_1) + m_{wa}(\psi_8 - \psi_7) = T_0 [m_r(s_1 - s_4) + m_{wa}(s_7 - s_8)]$
FCU	$I_{fc} = m_w(\psi_5 - \psi_6) - Q_{fc}(1 - \frac{T_0}{T_{i, air}}) = T_0 [m_w(s_6 - s_5) + \frac{Q_{fc}}{T_{i, air}}]$
Ground H/X	$I_{gh} = m_{wa}(\psi_7 - \psi_8) + Q_{gh}(1 - \frac{T_0}{T_{soil}}) = T_0 [m_{wa}(s_8 - s_7) - \frac{Q_{gh}}{T_{soil}}]$

$$Q + \sum m_i h_i = W + \sum m_o h_o \quad (2)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) Q_k - W + \sum m_i \psi_i - \sum m_o \psi_o = I \quad (3)$$

여기서, $\psi = (h - h_o) - T(s - s_o)$

각 구성기기 전후의 작동유체 상태량은 표 4에서 나타내었다. 지열원 열펌프의 운전 데이터는 참고문헌 [3]을 참조하였다. 각 주어진 온도와 압력조건에서 엔탈피(h)와 엔트로피(s) 상태량들은 상용 프로그램인 EES를 사용하여 값을 구하였다. 유동 엑서지 계산을 위한 냉매와 온수, 부동액의 기준 온도와 압력은 25℃와 100 kPa로 선정하였다. 팬코일유닛과 지중열교환기의 비가역성 계산을 위한 주위 온도 조건은 실내온도는 20℃, 지중온도는 13℃로 각각 설정하였다.

지열원 열펌프 시스템의 운전 데이터를 에너지 방정식과 엑서지 방정식에 대입하여 구성기기에

서의 비가역성을 분석하였다. 표 5는 각 구성기기에서의 열과 일, 그리고 비가역성을 나타낸다. 비가역성은 엑서지 파괴 또는 가용성 파괴로 표현되기도 하는데 일반적으로 엔트로피 생성량에 비례한다. 비가역성은 가역일과 실제일의 차이를 의미하며 비가역성이 크다는 의미는 주어진 상태변화 동안에 얻을 수 있는 일의 양이 작아진다는 것을 의미한다.

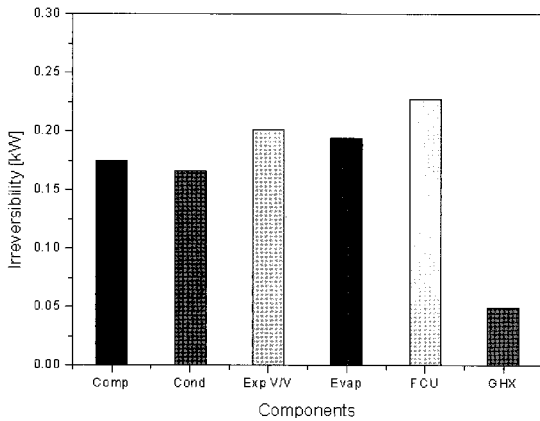
그림 3에서는 각 구성기기의 비가역성값을 그래프로 나타내어 비교하였다. 일반적으로 비가역성은 압축기에서 가장 크게 나타내는데 여기서는 압축기의 기계 효율과 모터 효율을 고려하지 않았으므로 비교적 적게 나타났다. 열펌프 구성기기에서는 팽창장치에서 압력강하가 크게 발생함으로 비가역성이 크게 나타났고, 상대적으로 응축기와 증발기에서는 비가역성이 적게 나타났다. 이것은 물대물 열펌프 사이클을 구성하였기 때문에

〈표 4〉 Operation data of a ground source heat pump system

State	T(℃)	P(kPa)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	m(kg/s)
1	3	480	407.6	1.763	0.019
2s	94.70	2600	452.1	1.763	0.019
2a	106.25	2600	463.2	1.794	0.019
3	60	2600	277.6	1.25	0.019
4	-1.15	480	277.6	1.285	0.019
5	41.31	-	173.1	0.5897	0.204
6	37.32	-	156.4	0.5363	0.204
7	6.8	-	28.67	0.1033	0.470
8	8	-	33.71	0.1213	0.470

〈표 5〉 Energy and exergy balance results of a ground source heat pump system

Components	Q (kW)	W (kW)	I (kW)
Compressor	-	-1.056	0.1751
Condenser	-3.526	-	0.1657
Expansion valve	-	-	0.2006
Evaporator	2.47	-	0.1940
FCU	-3.526	-	0.2275
Ground H/X	2.365	-	0.0491



[그림 3] 지열원 열펌프 시스템 구성기기의 비가역성

두 작동유체간의 온도차가 적은 조건에서 운전되었기 때문이다. 반면, 공기열원 열펌프 사이클에서는 열교환기에서 비가역성이 크게 나타나는데, 이러한 이유로 열교환기 성능향상을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

지중 열교환기에서는 가장 적은 비가역성을 나타내었는데 이는 지중 열교환기의 열교환 면적이 넓고 지중 온도가 연중 일정하므로, 외기에 비하여 작동유체와의 온도차가 적은 지중 열펌프의 우수한 성능 특성을 반영한다고 할 수 있다. 반면, 공조장치인 팬코일유닛에서는 작동유체와 공기간의 비교적 큰 온도차로 인한 열교환으로 비가역성이 크게 나타났다. 따라서, 전체 시스템 성능향상을 위하여 앞서 언급한 바와 같이 각 룸에 실내기를 장착하는 멀티시스템과 같은 다양한 방식의 실내공기 분배장치를 검토하는 것이 필요하다.

이상으로 신재생에너지의 한 분야인 지열 시스템의 열역학적 특성에 대하여 간략히 살펴보았다. 우리나라와 같이 에너지가 생산되지 않는 국가에서는 에너지 절감과 시스템 효율 향상을 위한 지속적인 연구개발 노력이 필요하다. 전세계적으로 지구온난화와 환경오염 문제 등에 관심이 고조되고 있는 요즘 우수한 재생에너지의 하나인 지열에 대한 연구가 좀더 집중되어야 할 시점으로 사료된다.

참고 문헌

1. Arif Hepbasli, A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, Renewable and sustainable energy reviews, 2008, 12, pp. 593-661.
2. Ebru Kavak Akpınar, Arif Hepbasli, A comparative study on exergetic assessment of two ground source heat pump systems for residential applications, Building and environment, 2007, 42, pp. 2004-2013.
3. A. Hepbasli, O. Akdemir, Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system, Energy conversion and management, 2004, 45, pp. 737-753.
4. Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, Exergy, Elsevier, 1st ed., 2007.