

히트펌프와 신재생열에너지에 대한 고찰

- 최근에 공기열원 및 하수열원 히트펌프를 신재생에너지의 범주에 포함시킬 것인가의 논의가 활발한 듯하다. 이를 위해 히트펌프와 신재생열에너지에 대한 올바른 이해가 필요하며 이에 대한 기본적인 내용에 대해 다루어 보기로 한다.

홍희기 / 경희대학교 기계공학과 교수, 설비저널 편집장 (hhong@khu.ac.kr)

이용주 / 한국소비자원 시험기획팀 선임연구위원 (yjleemk@kca.go.kr)

머리말

과거에 화석연료나 원자력이 아닌 에너지를 대체에너지, 자연에너지 등 다양한 용어로 사용하다가 최근에 신재생에너지로 정리되었다. 그리고 이 과정에서 재생에너지 8종류, 신에너지 3종류를 명시하였다. 사실 대체에너지라는 표현은 기존의 에너지를 대체할 수 있는, 자연에서 취할 수 있는 모든 에너지가 망라되었지만 지금의 신재생에너지에는 법으로 명시된 에너지원들만 인정하고 있는 상황이다.

새로운 에너지원을 포함시키기 위해서는 타당성이 뒷받침되어도 여러 그룹의 이해가 얽혀 논의 자체가 쉽지 않은 듯하다. 본고에서는 신재생에너지를 활성화시키고 증대시켜야 하는 원론적인 면에서 접근하기로 한다.

신재생에너지 보급에 가장 큰 딜레마는 기존의 화석연료 및 원자력에 비해 경쟁력이 상당히 떨어진다는 점이다. 따라서 어떤 형태로든 보조 및 의무화 등의 제도적·정책적 지원을 필요로 한다.

현재에도 공공기관 신·중·개축 건축물에 대한 신재생에너지 설치 의무화사업, 신재생에너지 의무할당제(Renewable Energy Portfolio Standard,

RPS), 서울시의 대형건물 신재생에너지 10% 의무화 등이 시행되고 있으며 조만간 시행될 신재생열에너지 의무화(Renewable Heat Obligation, RHO)도 가중계수 산정만을 앞두고 있다.

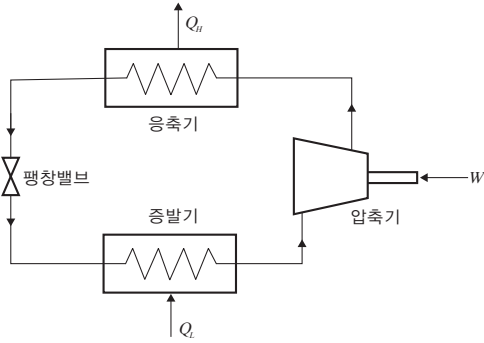
정부는 2020년까지 우리나라 총 이산화탄소 배출량을 2005년 수준보다 30% 저감하는 야심찬 목표를 발표했다. 또한, 2014년의 제2차 국가에너지기본계획에서는 2035년까지 신재생에너지의 보급목표를 1차 계획과 동일한 11%로 유지하였다.

현재의 신재생에너지 비율이 불과 3% 정도(이 중 2/3 정도가 폐기물 소각열인데 국제적으로는 신재생에너지로 인정하지 않는 추세임)로서 목표 달성을 위해서는 전기 생산 일변도의 현행 신재생에너지 정책에 변화를 요한다. 즉 우리나라 최종 사용에너지의 80% 정도가 열에너지로서 위의 목표를 달성하기 위해서는 신재생열에너지에 대한 올바른 이해와 관심, 지원이 집중되어야 할 시점이다.

히트펌프는 신재생에너지인가

히트펌프의 원리

최근에 해수열원에 이어 공기열원 및 하수열원



[그림 1] 냉동사이클의 구성도

히트펌프를 신재생에너지의 범주에 포함시킬 것인가의 논의가 활발한 듯하다. 이를 정책적으로 반영하기 위해서는 무엇보다도 히트펌프의 기본적인 원리를 이해할 필요가 있다.

히트펌프(heat pump)는 그림 1의 냉동사이클의 구성도에서 응축기에서 방출하는 열 Q_H 를 난방, 급탕 등에 활용하는 장치이다. 저온의 증발기에서 열을 흡수하여 고온의 응축기에서 열을 뽑아내는 것이 마치 낮은 곳의 물을 높은 곳으로 끌어올리는 펌프와 유사하다 하여 이와 같은 명칭이 붙은 것이다.

한편 증발기에서 Q_L 의 열을 흡수하여 주위의 온도를 떨어뜨리는 용도로 사용하면 일반적인 냉동기가 된다. 즉 사이클 관점에서는 히트펌프와 냉동기가 완전히 동일하다. 겨울철에는 Q_H 를 이용하여 난방을, 여름철에는 Q_L 을 이용하여 냉방을 하는 제품이 냉난방 겸용 히트펌프로써 별도의 난방기를 설치하지 않고 한 대로 냉난방이 가능하여 최근에 큰 각광을 받고 있다.

열역학을 학습한 독자들에게는 기초적인 내용이겠지만 냉동사이클에 에너지보존법칙을 적용하면

$$Q_L + W = Q_H \quad (1)$$

으로서 증발기에서 흡수한 열 Q_L 에 압축기에서 공급한 일 W 의 합이 응축기에서 방출하는 열 Q_H 가 된다.

히트펌프의 성능

이와 같은 냉동기 및 히트펌프의 성능은 성능계수(성적계수라고도 함, Coefficient Of Performance, COP)로 나타내며

$$\text{냉동기로서의 성능계수 } COP = Q_L / W \quad (2)$$

$$\text{히트펌프로서의 성능계수 } COP_H = Q_H / W \quad (3)$$

로 정의된다. 투입된 동력 대비 획득한 냉난방능력을 나타낸 지표이다. 식 (3)에 식 (1)을 대입하면 $COP_H = Q_H / W = (Q_L + W) / W = COP + 1$ 의 관계를 얻을 수 있다.

$COP_H = 3$ 인 경우($COP = 2$), 압축기에서 소요동력 1 kW를 공급하면, 증발기에서 주위(공기나 땅 등)로부터 2 kW의 열을 흡수하여 응축기에서 3 kW의 열을 방출하게 된다. 참고로 COP 나 COP_H 는 $\times 100$ 을 하여 %로 표시하지 않으며 그냥 무차원으로 나타내는 것이 일반적이다.

전기히터가 효율 100%라 해도 1 kW의 전기를 공급해서 1 kW의 열을 얻게 되는 것과 비교하면 히트펌프는 확실히 고효율에너지기기이다. 또한, 공기나 땅, 하천수와 같은 데서 열을 흡수하게 되므로 자연에너지 즉 신재생에너지 기기이다. 다만 현행 법규에서 지열은 신재생에너지로 규정된 반면 공기열원은 그냥 자연에너지일 뿐이다. 땅에서 뽑아낸 열은 신재생에너지고 공기나 물에서 뽑아낸 열은 그냥 자연에너지, 좀 이상하지 않은가? EU와 일본 등 대부분의 선진국에서 공기열원 히트펌프는 신재생에너지로 간주한다.

신재생에너지 기기로 적용받으려면

히트펌프의 성능에 미치는 요인

히트펌프의 성능을 나타내는 COP_H 는 제품 자체의 성능과 증발기·응축기 온도에 의해 결정된다. 즉 응축기와 증발기에 성능 좋은 열교환기를 사

용하고 마찰, 누설이 적은 압축기를 사용하면 성능이 향상된다. 또한, 동일 제품이라도 증발기 온도가 높을수록 응축기 온도가 낮을수록 COP_H 는 좋아진다. 겨울철에 평균적으로 공기온도보다 지중온도가 높기 때문에 지열 히트펌프의 증발기 온도가 공기열원 히트펌프의 증발기 온도보다 높으며, 전반적으로 COP_H 가 향상되는 것이다. 냉장고의 냉동실 온도를 낮추거나 에어컨 실내온도를 낮추면 전기 소모량이 많아지는 것도, 다른 이유도 있지만 비슷한 원리로 설명할 수 있다.

발전효율과 히트펌프 성능계수

히트펌프나 에어컨, 냉동기의 압축기는 일반적으로 전기모터로 작동되며 전기에너지를 소모하게 된다. 전기는 화력발전이나 원자력 발전을 통해 생산되며 우리나라의 경우 100의 열을 공급하면 36.52의 전기를 이용할 수 있게 된다. 이것이 '생산된 전기 W ÷ 공급된 열량 Q_1 = 발전효율 η '로서 계절마다 약간의 차이는 있지만 수용가 기준으로 겨울(12~2월) 36.4%, 봄(3~5월) 37.3%, 여름(6~8월) 35.7%, 가을(9~11월) 36.8%이며, 연평균 36.52%이다.

따라서 압축기 소요동력 W 를 얻기 위해서는 화석연료나 원자력으로부터

$$Q_1 = W/\eta \quad (4)$$

의 열(1차에너지)을 필요로 한다. 그리고 히트펌프를 가동하여 식 (3)으로부터

$$Q_H = W \cdot COP_H \quad (5)$$

의 열을 생산하게 된다. 이로부터 히트펌프의 열출력 Q_H 이 발전에 투입된 열 Q_1 보다 커야만 히트펌프의 존재 가치가 확실해진다. 그렇지 않으면 화석연료를 직접 태서 난방하는 것이 더 효율적이다. $Q_H > Q_1$, 즉 $W \cdot COP_H > W/\eta$ 으로부터

$$COP_H > 1/\eta \quad (6)$$

의 조건을 얻을 수 있다. 난방 시준인 겨울철의 발전효율이 36.4%이므로 COP_H 가 $1/\eta = 1/0.364 = 2.75$ 이상이면 보일러를 사용하는 것보다 히트펌프를 사용하는 것이 국가 에너지 차원에서 이득이다.

물론 전기히터를 사용하는 것은 논할 가치조차 없음을 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 농업용으로 저렴한 전기를 공급하다 보니 효율 85%의 기름보일러를 효율 100% 전기히터로 대체하였다고 자랑하는 코미디가 우리나라에서 벌어지고 있다. 힘들게 생산해서 고압 송전선을 통해 공급된 고급에너지인 전기를 100% 열로 변환하고 고효율을 논하는 것은, 효율의 기본적인 개념조차 없기 때문이다.

얼마만큼이 신재생에너지인가

앞서 언급한 히트펌프의 출력 Q_H 전부가 신재생에너지는 아니다. 식 (1)로부터 $Q_H = Q_L + W$ 이므로 Q_H 에서 W 을 뺀, 즉 공기나 지중에서 흡수한 Q_L 이 신재생에너지인 것처럼 보이지만 W 를 생산하기 위해 W/η 만큼의 화석연료가 사용되고 CO_2 가 발생한 것을 감안해야 한다. **신재생에너지 보급의 취지가 화석연료 대체 및 CO_2 저감이기 때문에 생산된 열량에서 투입된 소요동력의 1차에너지를 차감하는 것이 타당하다.** 이것은 히트펌프뿐만 아니고 다른 신재생에너지 기기에서도 동일하게 적용되는 사항이다.

즉 히트펌프의 출력 Q_H 가 아니고 $Q_H - W$ 도 아니며, $Q_H - W/\eta$ 만큼만 신재생에너지 E 로 간주하는 것이 옳다. 앞서 설명한 대로 히트펌프의 출력은 식 (5)의 $Q_H = W \cdot COP_H$ 이므로 히트펌프의 신재생에너지 E 는

$$E = Q_H - W/\eta = W \cdot COP_H - W/\eta = W(COP_H - 1/\eta) = W(COP_H - 2.75) \quad (7)$$

과 같다. 전술한 바와 같이 COP_H 는 일률적으로 정



해지는 값이 아니며 히트펌프의 성능과 증발기, 응축기 온도에 의해 결정되기 때문에 제조업체 및 설치업자는 검증된 값을 제시해야 한다. 이를 통해 압축기 소요동력 당 열출력 Q_H 및 신재생에너지 E 를 산출할 수 있게 된다. 한편 **히트펌프를 냉방용으로 사용할 때는 신재생에너지와는 아무 상관이 없음**을 강조해준다. 왜냐하면 응축기에서 방출되는 열을 단지 공기나 땅속으로 보내는 것에 불과하기 때문이다. 그러므로 냉방용으로 사용할 때 전력요금할인 등의 지원이나 혜택은 CO₂ 저감 측면에서 의미 없는 일이다.

현행 제도의 문제점

현재의 ‘공공기관 신·증·개축 건축물에 대한 신재생에너지 설치 의무화사업’에 제시된 단위에너지 및 원별 보정계수에서 히트펌프 중 유일하게 인정받고 있는 지열 히트펌프는 단위에너지생산량이 2,045 kWh/kW·yr이다. $COP_H=3$ 일 때 하루 8시간씩 겨울철 3개월 간 사용하였을 때 이와 유사한 열출력 Q_H 의 값이 나온다. 여기서 지열히트펌프의 COP_H 를 일률적으로 3으로 책정한 것은 우수 제품을 사용하지 말고 성능이 떨어지는 열가의 제품을 권장하는 것과 진배없다. 바로 앞에서 다룬 바와 같이 COP_H 가 커지면 열출력 및 신재생에너지의 양도 늘어난다.

훨씬 더 큰 문제점은 신재생에너지로서, 앞서 언급한 것처럼 식 (7)의 $E=Q_H-W/\eta$ 가 아닌 히트펌프의 열출력 Q_H 를 신재생에너지로 간주하였다는 점이다. $COP_H=3$ 일 때 압축기 소요동력 1kW를 투입하면 실질적인 CO₂ 저감효과인 신재생에너지는 $Q_H-W/\eta=3\text{ kW}-1\text{ kW}/36.4\%=0.25\text{ kW}$ 이나 현행 제도에서는 $Q_H=W \cdot COP_H=1\text{ kW} \times 3=3\text{ kW}$ 로서 $0.25\text{ kW}/3\text{ kW}=8.3\%=1/12$, **무려 12배나 크게 CO₂ 저감효과를 과장하게 된 것이다.** 정말로 이 만큼의 CO₂가 저감된다고 믿고 있다는 것이 놀라울 따름이다. 이는 국제적인 신재생에너지 산정량 평

가에도 어긋남을 지적하지 않을 수 없다. 열원으로 지열만 인정한 것도 같은 맥락에서 수정되어야 할 사항이다.

제도의 보완과 대책

모든 열원의 히트펌프

진정으로 신재생에너지를 많이 보급하고 화석연료 대체 및 CO₂ 저감효과를 도모하고 싶다면 난방철 평균 $COP_H > 2.75$ 인 **모든 열원의 히트펌프를 신재생에너지에 포함시켜야 한다.** 다만 COP_H 가 작은 히트펌프는 신재생에너지 기기로 인정을 받아도 그 효과는 미미할 것이다.

지금까지 $COP_H=3$ 인 지열히트펌프로 공공기관 신재생에너지 설치 의무화 양을 만족했다면 그보다 12배 큰 용량의 히트펌프를 설치해야만 만족시킬 수 있다. ‘실질적인 신재생에너지’/‘히트펌프의 열출력’= E/Q_H 가 이 괴리를 나타내며 식 (5)와 식 (7)으로부터

$$\frac{E}{Q_H} = 1 - \frac{1}{COP_H \cdot \eta} \quad (8)$$

COP_H	E/Q_H
3	8.3%
4	31.3%
5	45.0%
6	55.0%

이와 같이 고성능 히트펌프가 높은 COP_H 를 보이면 그 괴리는 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

식 (7)과 같이 $E=Q_H-W/\eta = W(COP_H-2.75)$ 만큼만 신재생에너지로 인정해야 하며, 제조업체 및 설치업자는 검증된 COP_H 를 제시하고 이 값을 이용하여 단위 신재생에너지 생산량을 산출해야 한다. 근거가 희박한 원별 보정계수는 없애거나 정책적인 측면에서 최소한으로만 적용해야 한다.

지열과 달리 공기열원은 수시로 온도가 변하므로

로 이를 고려하여 설치지역의 월별·난방철 평균 COP_H 를 제시해야 할 것이다. 발전배열, 해수나 하천수의 경우에는 월별 평균수온에 근거한 COP_H 를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 태양열 히트펌프는 이보다 훨씬 복잡하여 적용된 집열기 면적과 축열조 용량에 따라 달라지므로 동적 시뮬레이션을 통해 평균 COP_H 를 제시할 수 있을 것으로 보인다.

태양열시스템

1970년대의 두 차례 석유파동 후 1980년 초반에 등장한 것이 태양열온수기이다. 말도 많고 탈도 많던 시기를 겪고 2000년대 이후 침체의 늪에서 벗어나지 못한 상태이지만 그림 2와 같이 세계적으로는 태양열, 풍력이 신재생에너지 보급의 견인차 역할을 한 것을 알 수 있다.

공공기관 신재생에너지 설치 의무화에서 제시하는 단위에너지는 평판형 596, 진공관형 745 kWh/m²·yr이다. 에너지관리공단 인증 집열기를 대상으로 연간 사용하였을 때를 전제로 산정된 값으로 판단된다. 공공건물이나 대형건물에는 주로 온수급탕용으로 보급되고 있기 때문에 별문제가 없으나, 난방 전용으로 보급되는 경우에는 겨울철과 중간기만 고려해서 값을 줄여야 할 것이다.

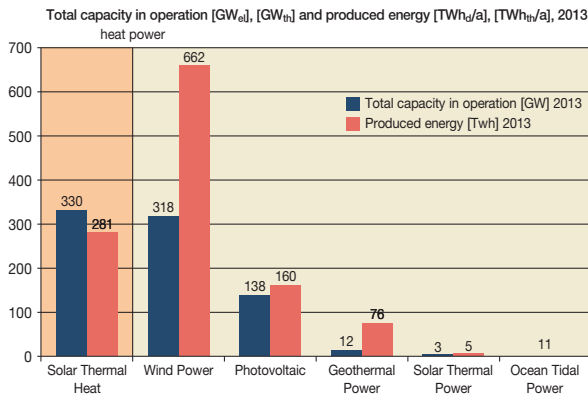
급탕전용은 과대설계를 막기 위해 통상 여름철에 100% 운전이 되도록 설계하는 것이 바람직하

며, 겨울철에는 급탕부하의 30~40% 정도만 태양열로 충당할 수 있다. 냉난방 및 온수급탕 겸용의 시스템은 여름철 냉방 중심으로 설계함으로써 시스템의 가용도를 극대화시킬 수 있다. 이 경우에 단위 에너지생산량은 보다 향상될 수 있으므로 이에 대한 연구와 보완이 요구된다.

신재생에너지 의무화(RHO)

우리나라 최종 사용 에너지의 80% 정도가 열에너지인 것으로 알려져 있다. 그동안 시행되어온 신재생에너지 의무화(RPS)는 전기생산 즉 발전과 관련된다. RPS의 공급의무자는 발전설비 용량이 500 MW 이상인 발전사업자가 대상이 되며, 이 제도에 속하는 사업자들은 매년 2%부터 10%까지(2012년부터 2024년까지 점진적으로 증대)의 발전량을 신재생에너지원으로 공급해야 한다. 2012년부터 시행되어 신재생 전기에너지인 태양광, 풍력 발전 등의 활성화에는 도움이 되었지만 태양열, 지열과 같은 신재생에너지 분야는 소외되는 경향으로 이를 보완하기 위한 제도가 RHO라 할 수 있다.

RHO제도는 1만m² 이상 신축 건축물을 대상으로 시행을 앞두고 있으며, 현재 월별 가중치가 조정되고 있는 상황이다. 기존의 공공기관 신재생에너지 설치 의무화에서 지적된 문제점을 보완하여 새로이 가중치를 산정하고 있는 것으로 판단된다. 아



[그림 2] 세계 재생에너지 월별 용량 및 연간 생산량(자료출처 : Ren21's Renewables 2013 Global Status Report)



직 공표가 된 상태가 아니기 때문에 여기서는 구체적으로 언급하기 어려우나, 앞서 언급한 바와 같이 $COP_H > 2.75$ 인 모든 열원의 히트펌프를 신재생에너지 기기로 인정해야 하며, 생산열량에서 투입된 전기에너지를 발전효율로 나눈 1차에너지를 차감한 것이 신재생에너지임을 강조해준다.

또한, 과급효과를 극대화시키기 위해서는 RPS와 마찬가지로 RHO에서 열공급사업자를 의무대상으로 포함시켜야 한다. 의무총량을 고정시킨 상태에서 시행하면 이중부담을 지지 않으므로 의무부과대상자의 반발을 무마할 수 있을 것으로 보인다.

맺는말

신재생에너지의 위상은 화석연료의 대체와 CO₂ 저감에 있다. 신재생에너지는 이미 기술의 완성도가 높아 정책적인 지원이 뒤따르는 경우 단기간

내에 많은 보급과 CO₂ 저감의 견인차 역할을 할 수 있다. CO₂ 저감효과를 일부 과장되게 평가하는 부분 등의 보완이 이루어지고 모든 자연에너지 열원의 히트펌프를 국제 기준에 맞춰 신재생에너지 기기로 인정하면 관련산업의 활성화와 더불어 설비산업의 특성상 제조, 설계, 시공, 감리 등 일자리 창출에 크게 기여할 것으로 확신한다.

참고문헌

1. 에너지관리공단, 공공기관 신·증·개축 건축 물에 대한 신재생에너지 설치 의무화사업 안내.
2. 노승탁, 공업열역학.
3. Duffie and Beckman, Solar engineering of thermal processes.
4. 한전, 산업통상자원부 및 에너지관리공단 홈페이지. 