

지열원 열펌프시스템 기술, 보급 현황

우정선 / 한국에너지기술연구원
이세균 / 충북대학교

GeoExchange systems are the most energy-efficient, environmentally clean, and cost-effective space conditioning systems available (source: "Space Conditioning: The Next Frontier," EPA 430-R-93-004, April 1993). 이 내용은 미국의 EPA(Environmental Protection Agency)에서 공인하고 있는 지열원 열펌프 시스템의 유용성에 대한 단적인 표현이다.

[그림 1]은 지열을 열원으로 하는 열펌프시스템과 기타 다른 형식의 열원장치와의 성능을 비교한 것으로서, 지열을 열원으로 하는 열원장치의 성능이 기타 형식에

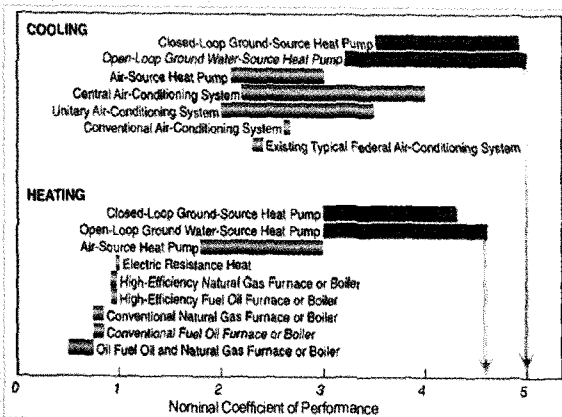


그림 1 열원장치별 성능 비교

비하여 성능이 월등하게 높은 범위에 있음을 보여준다.

선발국에서는 이미 30여년 이전부터 천부지열을 건물의 냉난방 및 급탕을 위한 열펌프시스템의 열원으로 이용하고 있으며 매년 10% 이상의 이용률 성장을 기록하고 있다. 일례로 미국은 매년 12% 정도의 이용률 성장을 기록하고 있다.

우리나라는 선발국에 비하여 많이 늦은 2000년경부터 국내에 도입되기 시작하였으며, 국내 보급 실적 또한 매우 미미하였으나, 2004년도 3월부터 시행한 공공건물에 대한 신재생에너지 이용 의무화 조치 이후로 지열을 열원으로 이용하는 열펌프시스템의 수요증가가 급격하게 성장하고 있으며, 공공건물에 설치하는 신재생에너지 이용 설비 설치 의무화 대상 설비 중 약 65% 내외가 지열을 열원으로 하는 시스템으로 선호되고 있다.

저탄소 녹색성장을 통한 온실가스 및 환경오염 축소와 관련하여, 정부에서는 지열 이용을 2030년까지 51배까지 확대와 신재생에너지를 이용하는 그린홈 100만호 프로젝트 등의 구체적인 목표로 추진하고 있다. 지열을 열원으로 하는 열펌프시스템을 주택에 보급하는데 가장 큰 장애의 한가지였던 가정용 전기에너지 사용의 누진제가 지열원 열펌프 사용전력에 완화되고 일반용 전기요금으로 적용하게 결정된 것은 또 하나의 지열원 열펌프시스템의 국내 보급 활성화 계기가 될 것으로 사료된다.

II. 열펌프 기술

열은 자연법칙 상 온도가 높은 영역에서 온도가 낮은 영역으로만 이동하며, 열을 온도가 낮은 영역에서 온도가 높은 영역으로 이동시키기 위하여는 열펌프라는 장치가 필요하다.

열펌프 이용 기술은 이미 오래전부터 국내외에서 이용되고 있는 매우 유용한 에너지절약 기술로서 건물의 냉난방은 물론 산업에서의 폐열 회수 등 여러 분야에서 활용되고 있으며, 열을 온도가 낮은 영역에서 온도가 높은 영역으로 이동시키는 장치라하여 열펌프라 부르고 있다.

[그림 2]는 압축식 열펌프 사이클 구성을 간략하게 도시화한 것이다. [그림 3]은 압축식 열펌프 사이클을 서로 다른 증발온도에서 운전되는 2개의 단순포화사이클의 성능변화를 볼 수 있도록 압력(P)-엔탈피(h) 선도 상에 나타낸 것이며, [그림 4]는 압축식 열펌프 사이클을 서로 다른 응축온도에서 운전되는 2개의 단순포화사이클의 성능변화를 볼 수 있도록 압력(P)-엔탈피(h) 선도 상에 나타낸 것이다. 압축식 사이클의 기본적인 구성요소는 크게 저온부 열교환기인 증발기(4-1 과정), 압축기(1-2 과정), 고온부 열교환기인 응축기(2-3 과정), 팽창변(3-4 과정)의 4개 요소로 구분되며 작동유체인 냉매는 증발, 압축, 응축, 팽창의 변화를 계속하며 순환한다.

저온저압의 습증기 상태의 냉매는 증발기에서 증발되면서 주변에서 증발잠열을 흡수하며 증발된 저온저압의 건조포화증기상태의 냉매로 배출된다. 증발기에서 배출된 저온저압의 건조포화증기상태의 냉매는 압축기에서 단열압축하여 고온고압의 과열증기상태의 냉매로 되어 응축기로 유입된다. 응축기로 유입된 고온고

압의 과열증기상태의 냉매는 응축잠열을 방출시키며 응축된 고온고압의 포화액체상태의 냉매로 되어 팽창변으로 유입된다. 고온고압의 포화액체상태의 냉매는 팽창변에서 등엔탈피 팽창을 하고 저온저압의 습증기 상태의 냉매로 증발기로 유입된다. 이와 같은 사이클을 반복하면서 열을 저온영역에서 고온영역으로 이동시킨다.

열원으로부터 증발기를 통하여 냉매에 유입되는 열량을 Q_{vap} , 응축기에서 히트싱크로 방출되는 열량을 Q_{cond} 그리고 점(1)과 점(2) 사이의 압축과정에서 압축일을 통해서 공급되는 열을 W_{comp} 라 하면, 난방성능계수(COP_h)는 다음과 같이 계산된다.

$$COP_h = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$

[그림 3]에서 증발온도가 낮을 때(Pe2)가 증발온도가 높을 때(Pe1)에 비하여 발열량의 증가((h₂-h₂'))에 비하여 압축기의 소요 동력의 증가((h₂-h₂)+(h₁-h₁'))가 커짐을 볼 수 있으며, 이를 통하여 열원의 온도(증발온도)

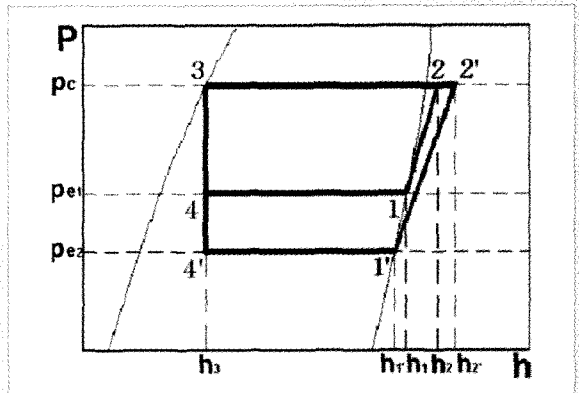


그림 3 압력-엔탈피 선도 상의 압축식 열펌프 사이클(a)

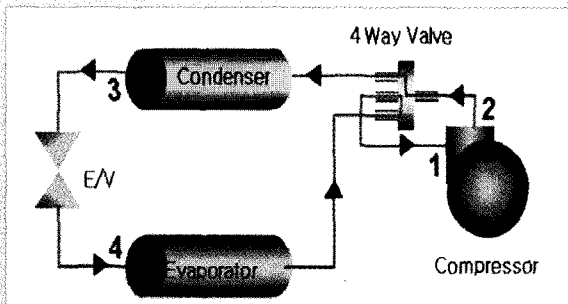


그림 2 압축식 열펌프 사이클

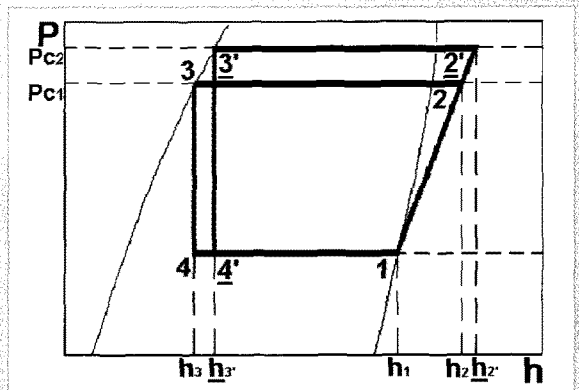


그림 4 압력-엔탈피 선도 상의 압축식 열펌프 사이클(b)

가 높으면 열펌프시스템의 난방성능(COPh)도 높아짐을 알 수 있다.

냉방성능계수(COPc)는 다음과 같이 계산된다.

$$COP_c = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

[그림 4]를 보면, 응축온도가 높을 때(Pc2)가 응축온도가 낮을 때(Pc1)에 비하여 흡열량은 감소(($h_4 - h_3$))하는데 반하여 압축기의 소요 동력은 증가(($h_2 - h_1$))함을 볼 수 있으며, 이를 통하여 히트싱크의 온도(응축온도)가 낮으면 열펌프시스템의 냉방성능(COPc)도 높아짐을 알 수 있다.

지열원 열펌프시스템의 냉방성능

열펌프를 이용하는 천부 지열이란 지표면으로부터 약 200m 정도의 비교적 얇은 지층 사이의 토양이 갖고 있는 열에너지를 의미한다(그림 5 참조).

이러한 지열의 특성을 보면 지표면에서 10 m 내외 정도 깊이까지는 외기 온도의 변화에 따른 영향을 받지만 그 이하로 내려가면 영향을 거의 받지 않으며 연중 약 13~15℃ 정도의 온도를 유지한다. 이러한 천부지열원은 보통 1km 이상의 수직굴착을 통하여 약 100℃ 또는 그 이상의 온도를 갖는 지열수를 양수하는 심부지열원과 구별된다. 보통 정상적인 지열경사는 심도 100m당 약 2~3℃ 정도이며 심부지열원의 개발은 이보다 지열경사가 월등히 높은 특별한 위치에서나 가능하므로 그 개발이 제한될 수밖에 없다. 그러나 천부지열원은 토양이 있는 곳에서는 항상 존재하므로 어디서나 개발이 가능하다. 다만 천부지열은 온도level이 낮은 관계로 직접 이용은 어려우며 열펌프 기술과 접목하여야 유용한 에

너지의 창출이 가능하다.

지열원은 동절기 열펌프의 열원으로의 역할뿐 아니라 하절기에 열펌프의 히트싱크로도 사용이 가능하며 공기열원과 비교할 때 월등히 우수한 열원 또는 히트싱크의 역할을 할 수 있다. 특히 국내에서 동절기에 발생할 수 있는 증발기 착상문제 등이 지열원에서는 근원적으로 제외되므로 지열원 열펌프시스템은 우리의 실정에 잘 맞는 냉난방설비라 할 수 있다.

지열원 열펌프의 열원(혹은 히트싱크)으로 이용하는 지하 200 m 정도까지의 지중의 연평균 온도 15℃ 내외는 지중의 열환경이므로, 공기는 물론 하천수 등과 같은 기타 열원에 비교하여 주변 환경의 영향도 받지 않는 연중 안정된 상태이다. 이와 같은 지열의 열원(혹은 히트싱크)으로서의 안정성을 공기의 온도레벨과 비교하면 그 큰 가치를 알 수 있다. <표 1>은 서울지역에 대한 공기와 지중온도를 비교한 내용으로서 월평균기온은 연중 약 38.8℃ 변화하며 일최저(대)기온은 연중 약 61.5℃ 이상 변화하여 그 폭이 크나, 지하 5 m의 평균지중온도는 연중 약 5.4℃ 정도 변화하며 지하 10 m의 평균지중온도는 연중 약 1℃ 정도 변화하여 지중의 온도가 level도 적당하고 안정성도 큰 것을 확인 할 수 있으며, 지열을 열원으로 하는 열펌프시스템의 성능이 기타 열원시스템에 비하여 성능이 좋은 이유를 알 수 있다.

큰 범위를 보면, 난방기의 열원온도는 지열원의 온도가 공기온도 보다 약 37.8℃ 정도 높고, 냉방기의 히트싱크온도는 지열히트싱크의 온도가 공기온도 보다 약 23.7℃ 낮으므로 앞의 [그림 3]과 [그림 4]에 대한 설명으로 지열을 이용하는 시스템의 성능이 높은 원인과 정도를 추정할 수 있다.

그러나 공기는 계속 유동하므로 온도가 일정하다고 볼 수 있으나, 지중의 암반은 고정된 상태이므로 지중으로부터 열을 계속해서 회수하거나 혹은 지중으로 열을 계속해서 유입시키게 되면 지중의 온도가 변화하여 성능이 낮아지게 된다. 이런 현상을 최소화 하는 것이 지

표 1 서울지역의 공기온도와 지중온도

구분	온도 범위(℃)	
공기온도	월평균	-3.5 - 25.3
	일최저(대)	-23.1 - 38.4
지중온도	지하 5 m 평균	11.4 - 16.8
	지하 10 m 평균	13.7 - 14.7

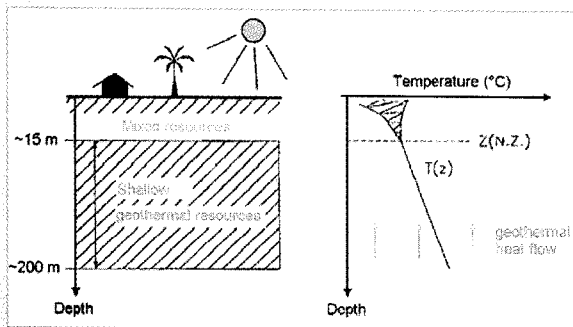


그림 5 천부지열 개념도

● 기 획 시 리 즈

열시스템 설계와 시공 과정의 중요한 검토사항의 한가지이며, 지열을 이용하는 시스템의 설계와 시공이 어려운 중요한 이유 중의 한가지이다.

지열을 이용하는 열펌프시스템이 기타 열원시스템에 비교하여 성능이 높고 안정적인 큰 장점이 있음에도 여러 가지 단점이 있으며, 일부 내용은 다음과 같다.

가. 초기투자비가 많이 소요 된다.

나. 지열시스템을 설치하는 현지 지중열물성에 대한 data확보가 필수적이다

- 공급되는 전기 상태가 매우 안정적인 상태에서 48시간 이상 연속 시험을 해야만 하는 현지 지중의 유효지중열전도도 측정시험 및 분석을 포함한 압반의 밀도, 비열 등에 대한 data가 필요하다.

다. 정밀한 설계가 요구되며 설계가 어렵다.

- 침투부하 계산은 물론 연간 소요되는 에너지부하 계산이 필요하다.

- 지중의 열환경 변화는 오랜 기간(20년 내외) 운전 을 염두에 두고 평가를 해야만 한다.

라. 설치공사의 단계(천공, 그라우팅, 프로싱 및 퍼징 등)가 많고 공사 진행 중에 확인해야 할 사항이 많다.

그럼에도 환경 친화적이며 20년 이상 안정적으로 높은 성능을 유지할 수 있는 지열 이용 열펌프시스템은 가장 신뢰할 수 있는 열원시스템임에 틀림없다.

3-1. 지열원 열펌프 시스템

[그림 6은 지열원 열펌프시스템의 종류를 보여주며, C)의 수직밀폐형 지열교환시스템이 가장 많이 설치되고 있는 형식이다. [그림 7은 수직밀폐형 지열교환시스템 형식의 보어홀 단면도로서 U-튜브를 한개 설치하는 형식과 U-튜브를 2개 설치하는 형식을 보여준다. 국내에는 2관식과 4관식 외에도 3관식 U-튜브를 적용하는 형식도 있다.

보어홀은 직경 130mm, 150 mm가 그리고 지중으로 약 150 m 내외의 깊이까지 시공을 하는 것이 최근 국내의 경향이다.

U-튜브는 HDPE 재질을 주로 사용하며, U-튜브 내측으로는 열유체(물+부동액)가 순환된다.

지중에 매설되는 U-튜브의 내부를 순환하는 열유체는 지중을 통과하면서 지중의 온도level 정도로 승온된

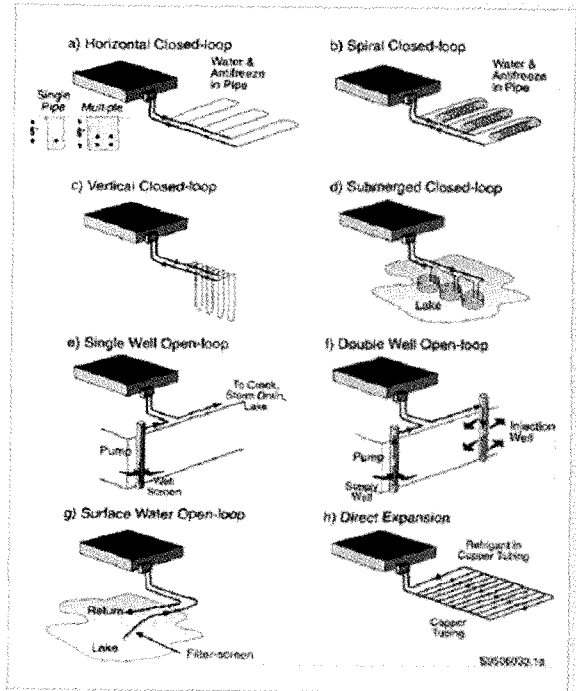


그림 6 지열원 열펌프시스템 종류

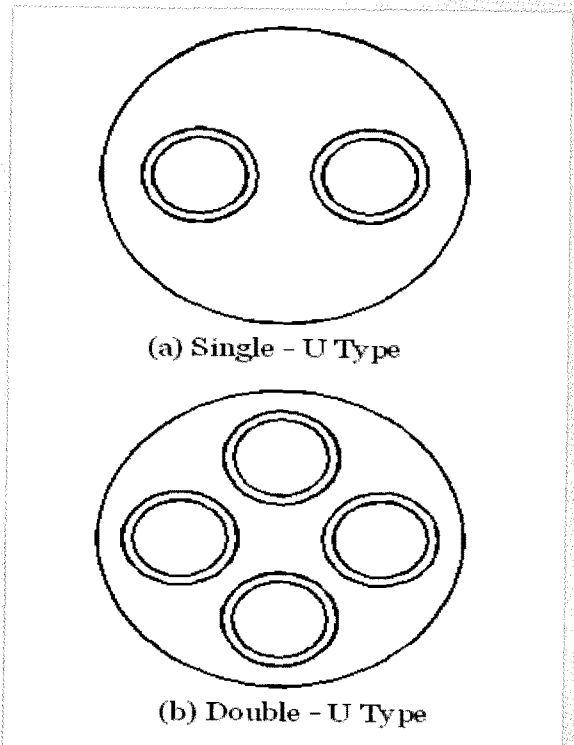


그림 7 보어홀 단면도

상태로 열펌프 증발기로 유입되며, 열펌프 증발기에서 열이 회수되어 온도가 낮아진 열유체는 다시 지중으로 유입되어 승온 되는, 원리적으로는 매우 간단한 사이클이 반복된다.

U-튜브를 적용하는 수직밀폐형 지열교환시스템에서 시스템 효율을 높이는 중요한 방법 중의 한가지는 지열교환기의 효율을 높이는 것으로서, 보어홀을 되채움 재료의 열전도성 향상, 되채움의 정밀 시공, U-튜브를 보어홀에 밀착시키기 위한 spacer의 적용 등이 그 수단에 속한다.

3-2. 지열원 열펌프시스템의 성능 인자

지열을 이용하는 열펌프시스템의 초기투자비는 지열교환기 설치비가 큰 비중을 차지한다. 지열교환기 설치

비는 설치 길이에 비례한다고 볼 수 있으므로 지열성능 관련 각 인자가 지열교환기 용량 결정에 어느 정도 영향이 있는지 파악할 필요가 있다.

지열을 열원으로 이용하기 위한 수직밀폐형 지열교환기의 용량 설계는 계산이 복잡하고 기타 다른 형식의 열원설비 시스템 설계에 비하여 고려해야만 하는 인자가 많으며, 필요한 인자들 중에서 지열교환기 용량과 관련이 있는 변수로서 주어

질 수 있는 인자들과 각 인자의 영향정도를 <표 2>에 표기하였다. 표에서 보는 바와 같이 지열전

도도, 보어홀 간격, U-튜브 형식, 관 간격, 되채움재의 열전도도, 보어홀 전열저항, 냉난방침두부하두부하, 연간 냉난방에너지부하는 지열교환기 용량 결정에 큰 영향을 주는 설계인자이며 지표면온도, 지열유량, 열펌프

의 계간 냉난방성능도 지열교환기 용량 결정에 중요한 영향을 주는 설계인자로서 결정에 주의를 요한다. 지중의 특성과 관계되는 지열전도도, 지중 암반의 체적열용량, 지표면 온도, 지열유량은 지열교환기를 설치하는 현지의 특성으로서 인위적인 조절이 불가능하지만 기타 설계 인자는 설계와 시공 과정을 통하여 개선이 가능한 인자들이다. 보어홀과 지열교환기와 관련된 인자들은 U-튜브 형식을 제외하면 U-튜브를 보어홀 벽면에 가능한 밀착시키고 되채움재의 성능을 향상시키는 2가지 조치로서 향상 가능하다. 냉난방침두부하와 연간 냉난방에너지부하는 건물이 난방주도인지 냉방주도인지 건물의 운전 경향에 따라 지중의 열환경 변화에 크게 영향을

주며, 지중의 열환경은 지열원 열펌프시스템의 성능과 지열교환기 성능에 영향을 주어 지열교환기 용량 결정에 중요한 인자로 작용한다.

전기한 지중열교환기 설계 인자들 중에 지중 특성인자인 지열전도도와 체적열용량은 열특성 측정을 통하여 값을 정하며 지표면 온도와 지열유량은 기존의 데이터를 이용하여 선정한다. 지열교환기의 종류, 매설간격 선정은 지열 이용시스템을 설치하는 현지의 특성을 고려하여 설계자의 의도에 따라 결정된다. U-튜브 관의

표 2 지열교환기 설계 인자가 열교환기 성능에 미치는 영향

항목	영향정도	비고
지중 특성		이하 인위적 개선 불가능
1 지열전도도	대	정밀한 현지 지열성능 측정, 분석
체적열용량	소	현지 지중의 암편 채취, 측정
지표면 온도	중	기존 데이터 이용
지열유량	중	기존 데이터 이용
보어홀, 지열교환기		이하 인위적 개선 가능
보어홀, 지열교환기의 종류		
2 보어홀 간격	대	충분한 간격 유지
U-튜브 형식	대	3관식, 4관식
관 간격	대	Spacer 적용
되채움재의 열전도도	대	열전도도 향상 재료 사용(Silica sand 첨가 등)
3 보어홀 전열저항	대	Spacer 적용, 정밀한 현지 지열성능 측정, 분석
4 건물침두부하		
냉난방침두부하	대	정밀 계산 지향
5 건물에너지부하		
연간 냉난방에너지부하	대	정밀 계산 지향
6 열펌프 성능		
계간 냉난방성능	중	고성능 열펌프 적용

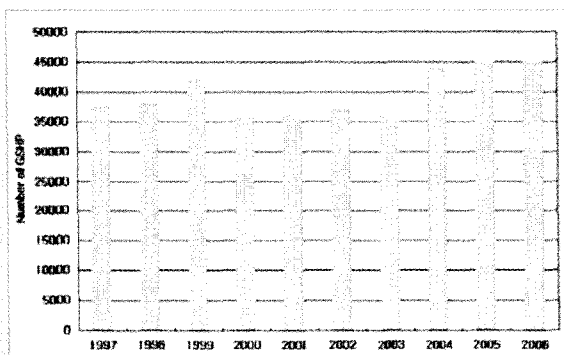


그림 8 미국의 연도별 지열원 열펌프시스템 보급 추이

● 기 획 시 리 즈

간격과 되체움재의 열전도도는 설계자의 의도에 따라 결정되는 인자이지만 관련 기술의 보유와 함께 경험을 필요로 한다. 보어홀 전열저항은 관련 기술의 보유와 경험이 있어야 하며 현지에서의 열특성 측정을 통하여만 결정이 가능하다.

IV. 지열이용 설비의 보급 현황

[그림 8]은 미국의 연도별 지열원 열펌프시스템 보급 추이를, [그림 9]는 유럽 일부 국가의 지열원 열펌프시스템 보급량을 보여준다.

북미, 유럽을 포함한 선발국에서는 이미 30여년 이전부터 지열을 열원으로 하는 열펌프시스템이 보급되고 있다. 미국, 캐나다는 보급에 필요한 기술을 교육시키는 전문기관도 운영되고 있다.

우리나라는 2000년경부터 국내에 도입되기 시작하였으며, 보급 실적 또한 매우 미미하였으나, 공공건물에 대한 신재생에너지 이용 의무화 조치 이후로 지열을 열원으로 이용하는 열펌프시스템의 수요증가가 급격하게 성장하고 있다. 또한 에너지관리공단 신·재생에너지 센터에서 관장하고 있는 일반보조보급사업, 지방보급사업, 융자사업 등이 국내 보급 활성화에 큰 틀로 기여하고 있다.

[그림 10]과 [그림 11]은 에너지관리공단 신·재생에너지센터에서 지원하는 사업을 통해서 보급된 용량을 집계한, 지열원 열펌프시스템의 국내 보급 추이를 나타낸 것이다. 공공건물에 대한 신재생에너지 이용 의무화 조치가 시행된 2004년도 경부터 보급이 급격하게 증가하는 경향을 볼 수 있다. 지원 없이 설치된 사업에 대한 내용은 포함되지 않은 것이므로 실제 국내에 보급된 총 용량은 더 크다.

[그림 11]에서 보는바와 같이 그동안 국내에 보급된 지열원 열펌프시스템은 대부분이 공공시설, 교육시설, 사회복지시설이 주를 이룬다. 특히 동 통계상으로는 가정용으로의 보급이 전무함을 볼 수 있다.

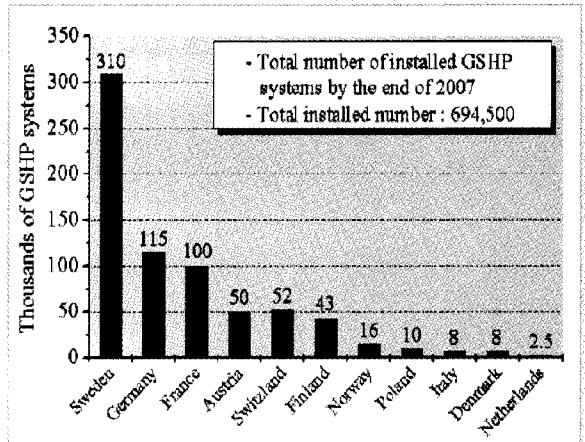


그림 8 유럽의 지열원 열펌프시스템 보급량

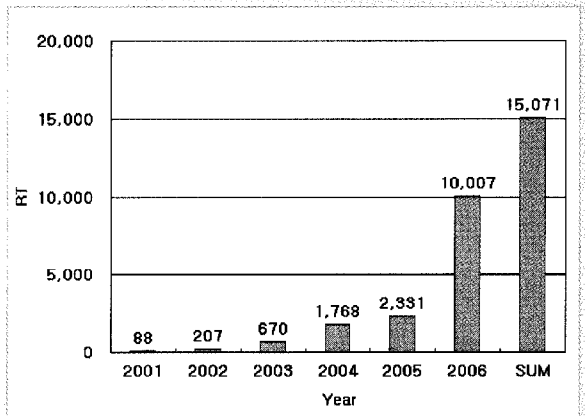


그림 10 연도별 지열원 열펌프시스템 보급용량

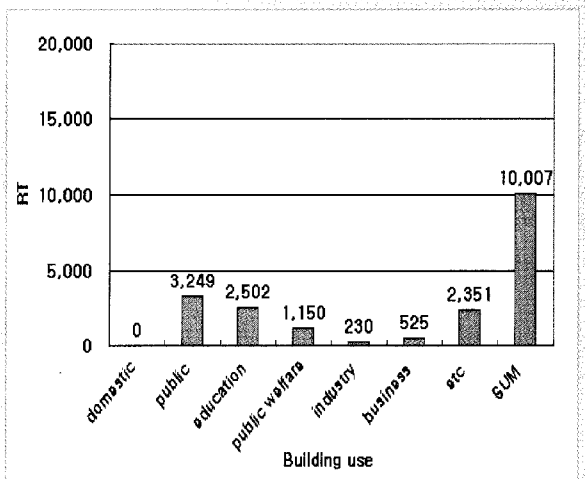


그림 11 건물 용도별 지열원 열펌프시스템 보급용량

정부에서는 지열 이용을 2030년까지 51배까지 확대와 신재생에너지를 이용하는 그린홈 100만호 프로젝트 등의 구체적인 목표로 추진하고 있다.

지열원은 계절간 변화하는 외기의 영향이 없고, 위치에 관계없이 거의 동일한 온도level을 유지하는 매우 유용한 열원이다. 연중 약 13~15℃ 정도의 온도를 유지하는 온도조건은 냉방과 난방은 물론 급탕용으로도 매우 유용하게 이용할 수 있다. 직접 이용할 수 없는 저온 상태의 에너지는 열펌프 이용기술과 조합함으로써 매우 유용한 level의 온도로 이용할 수 있다. 지열원 열펌프는 전기를 이용하는 형식이 주를 이루며, 열펌프 성능도 난방성능계수(COP_h)는 3.5 내외를 그리고 냉방성능계수는(COP_c) 4.0 내외가 되므로, 난방의 경우에는 사용되는 전기에너지의 3.5배 내외를 그리고 냉방의 경우에는 사용되는 전기에너지의 4.0배 내외를 얻을 수 있는 매우 유용한 에너지절약적 장치이므로 지열원 열펌프 시스템급의 보다 적극적인 보급이 필요하다.

지열을 열원으로 하는 열펌프시스템을 주택에 보급하는데 가장 큰 장애의 한가지였던 가정용 전기에너지 사용의 누진제가 지열원 열펌프 사용전력에 완화되고 일반용 전기요금으로 적용하게 결정된 것은 또 하나의 지열원 열펌프시스템 국내 보급 활성화의 계기가 될 것으로 사료된다.

그러나 지열원 열펌프시스템의 설계에 필요한 중요 data의 한가지인 현지 유효지중열전도도 측정에만 약 1500만원의 경비가 소요된다. 따라서, 주택용의 소용량 지열시스템에 대하여는 현지 유효지중열전도도 측정에 소요되는 경비와 복잡한 설계 절차를 배제하고 시공을 할 수 있는 간략화한 지열교환기 선정 기술, 기준이 필

요하며, 정부의 지원으로 동 연구를 추진하고 있다.

현존하는 최상의 에너지절약적 시스템인 지열원 열펌프시스템이 20여년 이상의 수명 한계까지 최적의 성능을 유지하기 위해서는 설계 및 시공의 정밀성이 필수적이다.

참고문헌

1. 지열냉난방시스템 성능평가 및 엔지니어링 기술 확보, 산업자원부(2005. 5.)
2. 우정선, 이세균, 김대기, 지중열원 열펌프 시스템의 난방성능 해석, 대한설비공학회 논문집 제16권 제12호 (2004)
3. 이세균, 우정선, 노정근, 김대기, "1차원 수치모델과 현지측정에 의한 지중열전도율 및 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구", 대한설비공학회 논문집 제18권 제10호 (2006)
4. 설비저널, 집중기획 지열에너지, Vol.38, No.1 (2009)
5. 2009 그린에너지 엑스포 세미나, 그린홈 100만호 보급사업에서 지열의 역할, 지열인력 양성센터 (2009. 4.)
6. Geothermal Heat Pumps Introductory Guide, NRECA, IGSHPA
7. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Installation Guide, NRECA, IGSHPA
8. ASHRAE Design/Data manual for Closed-Loop Ground-Coupled Heat Pump Systems
9. Geothermal Heat Pumps Make Sense for Homeowners, DOE