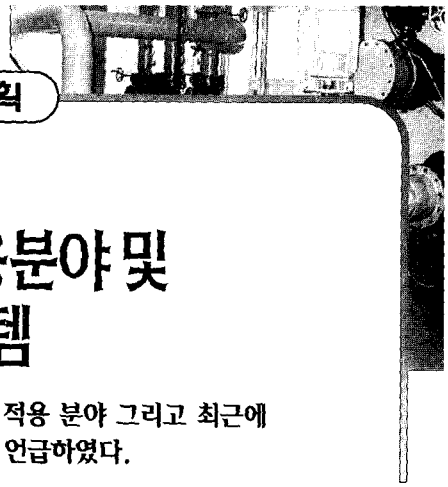


태양열 시스템의 효과적인 적용분야 및 태양열 지역냉난방 시스템

태양열 시스템의 적용 분야를 선정하는 데 고려되어야 할 사항과 적정 적용 분야 그리고 최근에 독일을 중심으로 보급 확산되고 있는 태양열 지역 난방 시스템에 대하여 언급하였다.

백 남 춘
한국에너지기술연구원 태양열연구센터(baek@kier.re.kr)

태양열 시스템과 적용 분야

국내외적으로 설비형 태양열 시스템은 온수 급탕, 건물의 냉 · 난방, 산업공정열, 농수산 분야, 폐수 처리, 열발전 등 화석 연료를 사용하는 대부분의 분야에 적용이 가능하다. 태양열로부터 얻을 수 있는 온도로 보면 70~80℃ 이하의 저온에서부터 수백℃ 이상의 태양열 발전, 수천℃의 태양로(solar furnace) 등 다양하다. 현재 활발하게 보급되고 있는 것은 평판형 집열기를 이용한 60-70℃ (동절기 기준) 이하가 대부분이며, 이보다 높은 온도를 효과적으로 얻을 수 있는 진공관식 집열기를 이용한 태양열 시스템도 최근 들어 보급이 활성화되고 있다. 물론 수백도(℃)로 집열하는 접시(dish)형 집광 시스템도 현재 연구되거나 시범 적용 되고 있긴 하지만 이것은 주로 열발전을 초점으로 한 것이다.

주로 보급이 이루어지고 있는 중저온 분야의 태양열 시스템은 일반적인 에너지 시스템과는 달리 적용 분야에 따라서 시스템의 성능이 달라지며, 또한 경제성도 달라진다. 즉 동일한 태양열 시스템을 어느 분야에 적용하느냐에 따라서 그 적용 효과가 크게 다르게 된다. 따라서 본 고에서는 태양열 시스템을 효과적으로 적용할 수 있는 분야에 대해서 논하고자 한다.

태양열 시스템에 영향을 미치는 주요 요소

태양열 집열 온도와 집열 효율

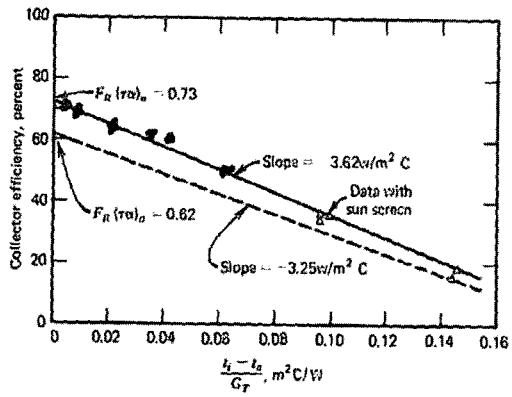
집열기의 성능은 전세계적으로 동일한 형태로 표기된다. 미국의 ASHRAE 기준이나, 유럽의 EN 또는 ISO의 집열기에 관한 기준에 의해 표기되며, 주로 실험적으로 구해진다. 평판형 집열기의 효율 곡선식은 **식 (1)**과 **그림 1**로 표시된다.

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{G_T} \qquad (1)$$

그림 1은 2 개의 서로 다른 집열기의 효율 곡선을 표시한 것으로 이것을 수식으로 표식하면 각각 **식 (2)**와 **식 (3)**과 같다.

$$\eta = 0.73 - 3.62\frac{T_i - T_a}{G_T} \quad \text{(그림 1의 상단부 효율 곡선)} \qquad (2)$$

$$\eta = 0.62 - 3.25\frac{T_i - T_a}{G_T} \quad \text{(그림 1의 하단부 효율 곡선)} \qquad (3)$$



[그림 1] 집열기의 열성능곡선

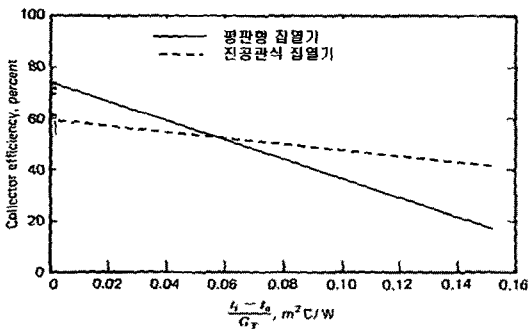
여기서 G_T는 집열면 일사량, $F_R(\tau\alpha)_n$은 y축과의 교점으로 집열기의 투과 흡수율을 나타낸다. 즉 집열기 투과체의 투과율과 흡수판의 흡수율을 곱한 것으로 집열기로부터 열손실이 없을 경우의 집열 효율(집열기 최고 효율)을 나타낸다. F_RU_L은 집열기의 열손실계수로 곡선의 기울기(slope)를 나타내며, T_i는 집열기로 들어가는 집열 매체의 온도, T_a는 외기 온도이다. 집열기 성능은 $F_R(\tau\alpha)_n$값이 클수록, F_RU_L값은 작을수록 좋아진다. 그러므로 투과체와 흡수판의 흡수율, 집열기의 단열이 집열기의 성능에 절대적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

이 집열기의 열효율 곡선으로만 보아도 태양열 시스템은 외기 온도와 집열 매체의 온도차 $T_i - T_a$가 적은 분야에 적용되는 경우가 집열 효율을 높일 수 있기 때문에 효과적이라는 것을 알 수 있다.

그림 2에 일반적인 평판형 집열기와 열손실이 적은 진공관식 집열기의 효율 곡선을 나타내었다. 이 그림으로부터 집열 온도가 높은 즉, $T_i - T_a$값이 큰 곳에서는 진공관식 집열기의 효율이 높음을 알 수 있다. 그러므로 동절기 난방 및 하절기 냉방에 효과적으로 사용될 수 있는 집열기는 진공관식 집열기이다. 그러나 온수 급탕과 같이 예열(pre-heating) 개념으로 사용되는 시스템에서는 가격이 저렴하고 저온에서의 집열 성능이 좋은 평판형 집열기가 오히려 더 효과적임을 알 수 있다.

열부하 분포와 태양열 시스템

열부하 분포는 태양열 시스템에 중요한 영향을 미



[그림 2] 평판형과 진공관식 태양열집열기 효율 곡선

친다. 열부하 분포라 함은 짧게는 하루 중 시간별 분포에서부터 길게는 계절별 분포까지를 의미한다. 여기서는 다음과 같이 구분해서 태양열 시스템에 미치는 영향을 설명하고자 한다.

i) 시간별 열부하 분포
ii) 일별 열부하 분포
iii) 계절별 열부하 분포(월별 열부하 분포)

우선 시간별 분포는 태양열 시스템에서 축열조의 크기와 관련이 있다. 만약 열부하가 야간에만 있을 경우 태양열 축열조는 주간에 집열되는 태양열을 100% 축열할 수 있는 용량이어야 한다. 반면에 주간에 태양열을 집열하는대로 다 사용한다면 축열조는 없어도 된다. 전자의 경우는 물론 태양열 축열조의 용량에 따라서 집열 온도가 달라지게 되고, 이것은 바로 태양열 집열 온도에 영향을 미치므로 집열 효율에도 영향을 미치게 된다. 즉, 축열조가 적정치보다 작을 경우 축열 온도가 높아지게 되어 집열 효율이 떨어지게 된다. 태양열 시스템의 열부하 분포는 태양열을 축열하지 않고 직접 사용하는 분야일수록 좋다.

일별 열부하 분포도 태양열 시스템에 중요한 영향을 미치게 된다. 예를 들어 주말이나 어느 특정 요일에 부하가 없을 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우 특별히 축열조를 크게 하지 않는 한 이로 인한 태양열 이용 효과는 떨어지게 된다.

계절적인 열부하 분포는 태양열 시스템의 경제성에 중요한 영향을 미친다. 한 예로 하절기에 열부하가 없는 경우와 있는 경우 태양열에 의한 에너지 절감량은 큰 차이가 있게 된다. 이것이 바로 동절기에 부하가 치우쳐 있는 태양열 난방 시스템이 크게 보급되고 있지 않는 원인 중에 하나라고 볼 수 있다. 이러한 것을 극복하기 위해 고안된 시스템이 바로 계간 축열 시스템이다. 이 시스템은 열부하가 없는 계절에 집열되는 태양열을 축열하기 위해 저가의 대규모 축열조를 설치해서 사용하고 있고 또한 시스템 설계에 반영되어야 한다.

이와 같이 태양열 시스템을 효과적으로 적용하기 위해서는 시간별, 일별, 월별 열부하 분포가 중요하게 고려되어야 한다.

태양열 의존율과 시스템 성능

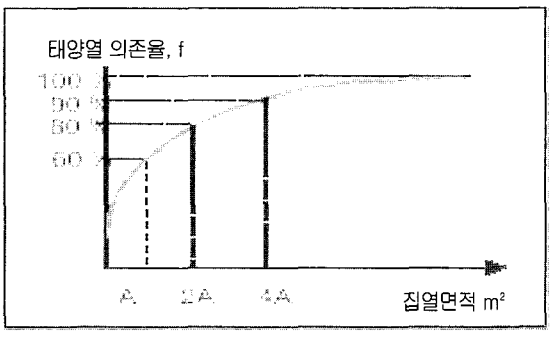
태양열 의존율이라 함은 전체 부하 중 태양열로 공급되는 에너지량의 비율을 의미하며, 다음과 같이 표시된다.

$$f(\%) = \frac{\text{태양열 사용량}}{\text{총 열부하}} \times 100 \qquad (4)$$

이 태양열 의존율은 **그림 3**에서 보는 바와 같이 의존율이 낮을 때는 집열 면적이 증가하면 거의 비례해서 태양열 의존율이 증가하지만 그 값이 커질수록 집열 면적 증가율에 따른 태양열 의존율의 증가율은 낮아지게 된다. **그림 3**의 예로 보면 집열 면적이 A일 때 태양열 의존율이 60%라면 집열 면적이 2배로 증가하면 태양열 의존율은 단지 1.33 배로 증가하고, 집열 면적이 4 배로 증가하여도 태양열 의존율은 불과 1.5 배로 증가한다. 이와 같이 태양열 의존율이 높아지면 질수록 집열 면적 증가율에 따른 태양열 의존율 증가율은 적어지게 된다. 즉, 이것은 태양열 의존율이 높아지면 질수록 집열 면적당 태양열 공급량(에너지 절감량)은 적어지게 되어 태양열 시스템의 경제성이 떨어진다는 것을 뜻한다. 따라서 태양열 시스템의 규모는 태양열에 의한 에너지 절감 효과와 태양열 의존율을 고려해서 적정한 선에서 결정되는 것이 중요하다. 일반적으로 연중 사용하는 태양열 온수 급탕인 경우 태양열 의존율은 70% 이하(주로 50~60% 정도), 난방인 경우 50% 정도로 한다.

사후 관리 문제

대체 에너지 원에 따라서 약간의 차이가 있을 수는



[그림 3] 태양의존율은 태양열 의존율

있으나 태양열 시스템을 포함한 대체 에너지 시스템은 사후 관리의 중요성이 크게 강조되고 있다. 이것은 제품의 신뢰성과 A/S 망이 기존의 에너지 기기에 비해 아직은 떨어지고 있다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 신뢰성 확보와 A/S의 필요성은 가장 먼저 보급이 이루어지기 시작한 태양열 분야에서 과거 20여년 이상 경험하여 왔다. 따라서 최근에 이에 대한 보완이 중점적으로 이루어지고 있으며, 현재 진행 중인 태양열 제품의 인증 사업도 제품의 신뢰성 확보의 일환으로 실시되고 있다.

그러나 아무리 제품의 신뢰성이 확보된다 하더라도 보급된 시스템은 적정한 관리가 필요하다. 과거에 보급된 태양열 시스템 상의 문제 발생 유형을 보면 많은 부분이 다음과 같은 관리의 소홀에서 그 원인을 찾을 수가 있다.

- 집열기 또는 배관 상의 누수로 인한 작동 매체의 부족
- 작동 회로 상에 공기가 차서 발생하는 작동 매체의 순환 불량
- 펌프의 고장
- 압력 안전 밸브, 공기빼기 밸브 등 각종 밸브류의 고장
- 제어 장치 또는 제어용 센서의 작동 불량

이러한 고장은 기존 에너지 시스템에서도 흔히 발생할 수 있는 일반적인 문제점으로 관리가 이루어지는 시스템에서는 쉽게 발견되고 또한 간단히 수리될 수 있는 것들이다. 따라서 태양열 시스템은 이러한 관리가 이루어져야 하는데 현실적으로 관리가 되지 않는 분야가 많다. 이러한 사소한 문제들은 시스템이 정상적으로 관리된다면 관리자 선에서 즉시 보완이 될 수 있는 것들이다. 이러한 사소한 문제가 장기적으로 방치된다면 또 다른 더 큰 문제가 발생되게 된다. 따라서 태양열 시스템은 가급적 사후 관리가 가능한 분야에 우선적으로 보급되어야 한다. 사후 관리가 가능한 분야는 결국 관리자가 있는 분야이며 주로 대규모 태양열 시스템이라고 볼 수 있다.

우리 나라보다 기술 개발 및 보급 정책에서 앞서 있는 독일을 중심으로 한 유럽에서도 이러한 사안을 감안해 '90년대 말부터 태양열 시스템 보급을 대규모 시스템에 초점을 맞추어 하고 있다.

태양열 시스템의 적정 적용 분야

상기의 태양열 시스템에 영향을 미치는 주요 요인을 고려해볼 때 태양열 시스템 적용 효과가 좋은 분야는 다음과 같은 조건을 만족하는 분야이다.

i) 연중 태양열 사용 기간이 긴 분야 : 태양열에 의한 에너지 절감 효과가 크다.

ii) 가능한 한 저온을 이용하는 분야이거나 고온을 필요로 하는 분야라도 태양열은 저온으로 예열해서 사용할 수 있는 분야 : 열에너지의 효용성 측면에서 보면 고온으로 집열해서 사용하는 것이 여러 가지 용도로 사용할 수 있기 때문에 효과적이나 고온을 얻기 위해서는 집광 장치, 추적 장치 등의 복잡한 장치가 필요하며 특히 우리 나라와 같이 청명도가 낮은(연평균 0.5 미만) 지역에서는 집광 가능한 일사량(직달 일사량) 비가 낮기 때문에 비효율적이다. 또한 집열기 특히 평판형 집열기 특성상 전술한 바와 같이 집열 온도가 높을수록 효율이 저하되기 때문에 저온 분야에 이용되는 것이 효율적이다. 그러나 고온을 사용하는 분야라도 태양열 시스템은 저온으로 집열해서 일련의 예열 개념으로 사용될 수 있는 분야에서는 집열 온도를 필요 이상으로 높일 필요가 없기 때문에 효과적으로 태양열을 적용할 수 있다. 만약 진공관식 집열기를 사용한다면 100℃ 이상까지도 효율적으로 집열해서 사용할 수 있다.

iii) 규모가 크고 관리자가 있는 분야 : 기존의 에너지 시스템을 위해 관리자가 있는 분야에 태양열 시스템이 설치되는 것이 태양열 시스템 관리가 잘 될 수 있으므로 효과적이다.

iv) 집열기 설치 공간 확보가 가능한 분야 : 태양열 시스템은 집열기를 설치할 수 있는 비교적 넓은 공간을 필요로 한다. 따라서 아무리 적용 효과가 좋은 분야라 하더라도 집열기를 설치할 수 있는 공간 확보가 불가능한 곳은 태양열 시스템 적용이 불가능하게 된다.

이와 같이 태양열 시스템은 전술한 몇 가지 조건을 충족시키는 분야에 적용되는 것이 효과적이라고 할 수 있다. 이러한 분야는 대체적으로 온수를 많이 사용하는 분야이며 고온의 온수를 필요로 하는 분야라도 태양열은 '예열(pre-heating)' 개념으로 사용될 수 있도록 시스템을 설계하고 운전하도록 하여야 태양열 집열 효율이 높아진다. 이것도 바로 태양열 난방 시스템보다 태양열 온수 급탕 시스템이 더 효과적인 이유이다.

좀더 구체적으로 태양열 시스템을 적용하기에 적정한 분야를 세부적으로 보면 대략 다음과 같다.

- 수영장, 목욕탕, 스포츠 센터 등 온수를 많이 사용하는 상업용 건물 : 수영장과 목욕탕, 스포츠 센터 등은 연중 사용 기간이 길며 에너지 소비가 많은 분야이다. 이 분야는 저온의 온수를 사용하거나 태양열로 일정 온도까지 승온하고 그 이상의 승온은 보조 열원으로 하는 예열 방식으로 운전할 수 있기 때문에 태양열에 의한 에너지 절약 효과가 크다. 또한 이 분야는 시스템을 관리하는 기사가 있기 때문에 태양열 시스템 유지 관리가 용이하다.
- 양식장, 양만장(민물장어 양식장) 등 : 전형적으로 저온을 사용하면서 연중 사용 기간이 긴 분야이기 때문에 태양열 이용 효과가 크다.
- 골프장의 온수 급탕 분야 : 태양열 시스템 설치 여건이 가장 좋은 적용 분야 중에 하나로서 이미 많은 시스템이 보급되었다.
- 복지 시설(양로원, 감호소, 의료재활원, 직업훈련원 등)의 온수 급탕 시스템 : 복지시설에 태양열 시스템을 이용한 온수 공급은 에너지 절감 차원에서는 물론이고 복지 향상 차원에서도 상당히 고무적이라 생각되며, 현재 지역 에너지 사업을 통해 많이 보급되고 있는 분야이다.
- 기숙사, 연수원, 여관, 호텔 등 숙박 시설 : 도시 지역 내에서는 비교적 설치 여건이 좋은 적용 분야 중에 하나로 온수를 많이 사용하는 분야이다.
- 집단 주거 시설의 온수 시설 : 대규모 시설이기 때문에 단독 주택의 경우보다 집열 면적당 설치 비용을 줄일 수 있고, 시스템 관리가 용이하므로 효과적이다.
- 산업 공정열 분야 : 계절에 관계없이 많은 양의 온수나 공정열을 사용하는 산업 분야에 태양열 적용은 아주 효과적이다. 이 분야는 일사량 강도가 큰 하절기에도 태양열을 효과적으로 사용할 수 있으며, 집열기의 설치 여건도 좋은 편이고, 시스템이 대형화 될 수 있어 에너지 절감 효과가 크며, 또한 시스템을 효과적으로 유지 관리할 수

있는 기사가 있기 때문에 앞으로 태양열 시스템 적용이 크게 기대되는 분야이다. 비교적 높은 온도를 필요로 하는 분야의 경우 진공관식 집열기가 효과적으로 사용될 수 있는 분야이다.

- 건물의 냉난방 분야 : 아직은 국내에서는 태양열로 냉난방을 하는 시스템 보급이 거의 없는 실정이다. 동절기에는 난방 및 온수 급탕, 하절기에도 냉방과 온수 급탕에 사용할 수 있다는 점에서 향후 보급을 고려해볼만 하다.
- 주택의 온수 공급 : 태양열 온수기가 제품화되어있기 때문에 손쉽게 설치 가능하고 또한 보조 열원으로 값싼 심야 전기를 사용하고 있기 때문에 보급이 용이하며, 이미 전국에 약 17만여 대가 보급되었다.

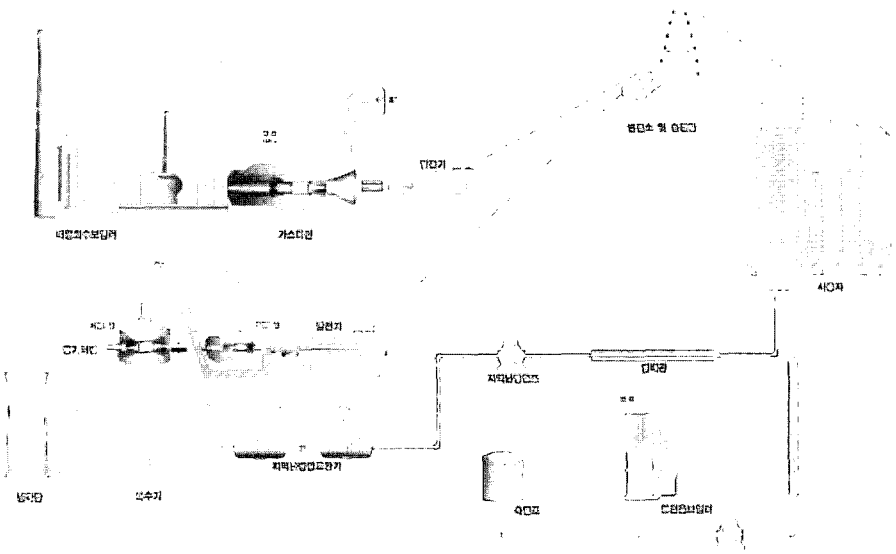
태양열 지역 냉난방 시스템

갈수록 증가 추세에 있는 지역 난방(냉난방) 시스템은 비록 대부분 도심지에 위치해 있지만 여러 가지 측면에서 태양열 적용이 기대된다. 일반적으로 지역 냉난방 시스템은 단지의 규모가 크고 갖가지 시설이 혼재해 있기 때문에 열부하가 상당히 크며 또한 연중 내내 열부하가 지속적으로 발생한다. 지역 냉난방 시스템은 **그림 4**에 나타낸 시스템 개요도에 있는 바와 같다. 이 회로도에서 열병합 발전소에서 지역 난방 회로로 공급되는 지역 난방수의 열매체 온도는 대략 95℃ 전후로 비교적 높다. 그러나 다시 열병합 발전소의 지역 난방 열교환기로 회수되는 온도는 약 65℃ 정도가 된다. 따라서 태양열은 바로 이러한 회수되는 열매체를 가열하는 것이다. 지역 난방 시스템이 일반적으로 열부하가 상당히 크고 상대적으로 태양열 집열기 설치 면적이 제한되기 때문에 아무리 많이 설치한다 하더라도 태양열 의존율은 아주 적을 수밖에 없다. 따라서 태양열로 승온할 수 있는 온도는 불과 몇 ℃ 정도에 불과하다.

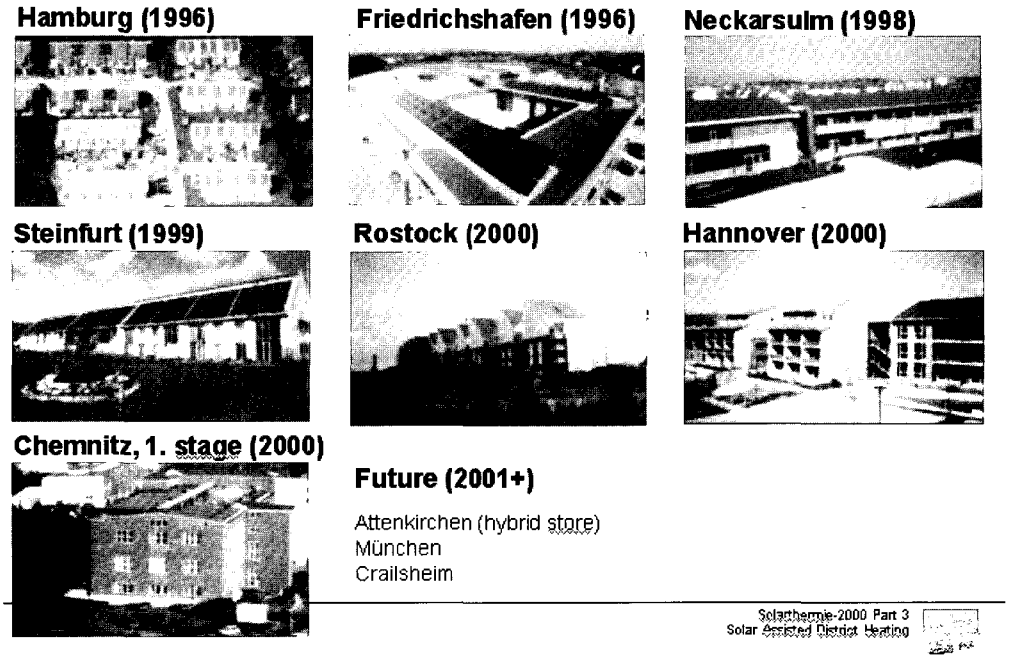
이러한 지역 냉난방 시스템에 적용되는 태양열 시스템은 항상 집열되는 태양열보다 월등히 많은 부하가 존재하기 때문에 태양열 축열조가 불필요하다. 따라서 태양열 시스템은 상대적으로 설치 비용이 적게 들어 경제성이 향상된다.

또한 지역 냉난방 회로에 태양열 시스템의 적용은 여러 개의 시스템으로 분산되어 설치된다 하더라도 전부 지역 난방수 회수(return) 배관에 연결 가능하기 때문에 전혀 문제가 없다.

단지 지역난방 지역 내에 태양열 집열기 설치 공간을 어떻게 확보하느냐가 향후 제도적으로 해결해야 할 문제 중에 하나이다. 현재로서 태양열 집열기의



[그림 4] 지역냉난방 시스템 개요도



[그림 5] 'Solarthermie 2000' 프로젝트로 시범 조성된 태양열 지역난방 시스템

설치와 활용이 가능한 곳으로는 기계동이나 학교와 같은 공공 건물의 지붕 등을 들 수 있다.

독일의 경우는 우리 나라의 지역 난방 시스템과는 약간 다른 개념이지만 '90년대 초중반부터 10개년 계획으로 'Solarthermie 2000' 이라는 프로젝트를 통해서 대규모 태양열 지역 냉난방 시스템을 시범 보급하고 있다. 이 프로젝트는 1993년에 착수되어 2002년 말까지 10년간 지속되었으며, 그 결과로 2003년 말 현재 **그림 5**와 같은 7 개 대규모 태양열 지역 난방 시스템이 시범 적용되었다. 그런데 그 보급 효과가 좋아서 'Solarthermie 2001 Plus' 라는 프로젝트로 이 사업을 연장하여, R&D 및 보급 사업을 지속적으로 수행하고 있다.

이들 대규모 태양열 단지는 대도시 주변에 신규로 조성되는 단지로 주거 건물, 상가, 공공 시설 등이 있는 혼재해 있으며 건물 지붕, 빈 공터, 주차장 등 집열기 설치 가능한 모든 공간에 수천~수만 m^2의 집열기를 설치해서 하나의 통합된 대규모 태양열 시스템으로 운전되고 있다. 이 태양열 시스템은 신규 건물에 설치되는 태양열 시스템도 기존의 태양열 시스템에 연계가 가능하도록 설계된 것이 하나의 특징이다. 또한 이들 시스템은 부하가 적은 하절기 태양열을 효과적으로 이용하기 위해서 하절기에 집열된 태양열을 저장하였다가 다른 절기에 이용할 수 있는 대규모의 저가 축열 장치인 계간 축열(seasonal storage) 장치를 갖고 있다.

결 언

태양열 시스템은 전술한 바와 같이 적용 분야에 따라서 적용 효과가 크게 차이가 난다. 지금까지 보급된 태양열 시스템 중 대부분은 적절한 분야에 적용이 되어 왔지만 그렇지 않은 것도 상당히 많아서 사용자들의 불만을 사고 있는 실정이며, 이러한 언성이 태양열 시스템에 대한 신뢰성을 떨어뜨리고 있다. 앞으로는 태양열 시스템의 효율 및 경제성에 영향을 미치는 사항을 고려해서 적정 분야에 우선적으로 적용하여야 하며, 그렇게 함으로써 태양열 시스템의 신뢰성을 향상시키고 나가서는 보급 확대를 도모하는 데 크게 이바지 할 수 있을 것으로 본다.