

고온 태양열발전 기술

이 글에서는 태양에너지의 첨단 활용분야 중 하나인 고온 태양열을 이용한 발전기술의 개요와, 이를 구성하는 요소기술, 그리고 태양열발전 분야의 국내·외 현황과 전망에 관하여 소개하고자 한다.

강용혁 / 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부, 부장 e-mail : yhkang@kier.re.kr
 김진수 / 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부, 선임연구원 e-mail : jnskim@kier.re.kr

태양에너지를 이용하는 기술이라 하면 사람들은 흔히 온수 활용을 위해 지붕에 설치된 평판형 집열기나 열을 전기로 바꾸어주는 태양전지 패널을 머릿속에 떠올리게 된다. 그러나 이마저도 일정 수준의 지식이나 경험이 없는 평범한 사람들에게는 그 용도까지 서로 어떻게 다른지 혼동되고 있는 것이 현실이다. 따라서 이들과는 또 다른 분야라 할 수 있는 태양열발전 기술을 소개하기 위해서는 태양에너지를 이용하는 서로 다른 방법들에 대한 간략한 분류와 이해가 선행되어야 하겠다. 태양에너지를 이용하는 기술 영역은 크게 열을 이용하는 태양열 분야와 빛을 이용하는 태양광 분야로 분류될 수 있다. 태양열 이용 분야의 경우 복사에 의해 전달되는 태양에너지 중 주로 가시광선 영역의 파장을 흡수율이 높은 검은 표면을 가진 물체에 흡수시켜 열에너지 형태로 전환시키고 획득된 열을 활용한다. 반면, 태양광 이용 분야는 태양 복사에너지 중 특별한 영역대의 파장을 가지는 빛을 태양전지라 불리는 장치를 통하여 전기에너지로 변환시켜 이를 활용하는 경우이다. 한편, 고온 태양열을 이용한 발전기술은 태양열을 이용하여 전기를 생산코자 하는 기술로서, 열에너지를 이용한다는 측면에서는 태양열 이용기술의 한 분야로 분류될 수 있다. 그러나 보다 고온을 열을 필요로 한다는 점과 획득된 열을 발전을 위한 열원으로 사용한다는 측면에서 차별성을 가진다.

이 글에서는 고온 태양열을 이용한 발전 기술의 요소를 구성하고 있는 세부 기술, 태양열발전의 분류, 열에너지를 저장하거나 화석연료와 함께 복합발전을

행하는 경우, 그리고 태양열발전 분야의 국내·외적 현황과 전망에 관한 내용을 순차적으로 소개하고자 한다.

태양열 발전을 위해 필요한 요소 기술

고온 태양열 발전을 위해서는 태양 복사에너지를 고밀도 집적하는 집광장치가 있어야 하며, 열원 획득을 위한 흡수장치, 그리고 흡수된 열에너지를 이용하여 발전을 행하는 발전장치가 필요하다. 또한, 시간과 기후조건에 따른 태양에너지 공급의 불균일성을 극복하고 발전장치의 가동률을 높이기 위하여 별도의 열에너지 저장장치를 함께 사용하거나 화석연료와 함께 발전을 행하는 복합 시스템을 구성하기도 한다. 이 글에서 열에너지 저장 및 복합 시스템 구성과 관련된 부분은 별도의 내용으로 다루기로 하겠다.

고온의 태양열을 이용한 발전에서 열에너지 공급 이후에 이루어지는 공정은 기존의 화석연료를 이용한 발전과 동일하다고 할 수 있다. 따라서 발전 사이클을 운전하기 위하여 필요로 하는 고온의 열원을 어떻게 태양에너지로부터 얻을 것인가 하는 문제는 태양열발전의 중요한 핵심요소가 된다. 고온의 열원을 태양으로부터 얻기 위해서는 고 배율의 집광장치를 필요로 한다. 즉, 복사에너지를 열에너지로 전환시키기 이전에 광학적인 방법으로 빛에너지의 밀도를 높여주어야 하는데, 이러한 집광의 정도는 동일한 면적에서 집광이 없는 직달일사의 경우와 비교하여 sun이라는 단위로 흔히 표현한다. 즉, 1,000배의 집광

47-



이 이루어지면 1,000sun이라고 표현하게 된다. 집광을 위해서는 반사경을 이용한 다양한 형태의 집광장치가 사용되는데 그 방식은 크게 세 가지로, 구유형(parabolic trough), 타워형(power tower), 그리고 접시형(poarabolic dish)으로 나뉜다. 구유형 집광장치의 경우, 태양의 고도만을 추적하는 말구유 모양의 포물면 반사경을 이용하여 집광을 행하게 되는데 이때 태양빛은 반사경 전면에 선형으로 모아지게 된다. 구유형 집광장치의 집광비는 일반적으로 수십 sun이며 획득 가능한 온도는 약 300~500°C 정도이다. 타워형 집광장치는 헬리오스태트(heliostat)라고 불리는 수백 혹은 수천 개의 평판형 거울을 사용하여 집광을 행하는데, 각각의 거울은 중앙부에 위치한 타워의 상단으로 태양빛을 반사시켜 집광을 행하게 되며 이를 위해 개별 거울은 태양의 위치(방위와 고도)를 인식하고 추적해야 한다. 타워형 집광장치의 집광비는 반사경의 수에 비례하여 증가하며 일반적으로 수백~수천의 집광비를 얻고 있다. 집광방식의 특성상 구유형과 타워형은 일반적으로 MW급 이상의 대용량 발전에 사용되고 있다. 마지막으로 접시형 집광 방식은 보다 작은 면적에서 고 배율의 집광이 가능토록 고안된 집광 방식으로 포물면을 가지는 접시 모양의 태양추적 반사경을 이용하여 태양빛을 한 곳으로 모아 고온 획득이 가능토록 하는 방식이다. 이 경우 비교적 작은 면적으로 수백~수천에 이르는 집광비의 획득이 가능하여 수~수십 kW 규모의 소규모 독립형 발전을 위한 집광장치에 사용되고 있다. 최근에는 구유형 집광의 다른 형태로 작은 너비의 평판형 반사경을 평면에 순차적으로 배열하고 각각의 반사경이 서로 다른 각도로 태양빛을 반사시켜(결과적으로 포물면을 효과를 가지도록 하여) 상부에 선형의 집광이 이루어지도록 하는 프레즈넬(Fresnel)형 집광장치가 개발되어 응용되어진 바도 있는데, 이는 제작 비용이 적고 제한된 면적을 최대한 이용할 수 있다는 장점으로 주목을 받고 있다. 이러한 다양한 형태의 집광장치들은 태양 추적 기술, 고효율·고내구성의 반사경 제작 기술 등의 세부 요소기술을 필요로 한다.

흡수장치는 집광장치를 통하여 고 배율로 집적된

태양 복사 에너지를 흡수하여 열에너지로 바꾸어주는 장치이다. 이 장치는 흡수율이 높은 검은색 표면을 통하여 열에너지를 회수한다는 측면에서는 일반적으로 태양열 집열기와 크게 다르지 않으나, 장치를 구성하는 재료가 수백에서 때로는 수 천도에 이르는 높은 온도를 견디어 내야하고, 작은 면적에서 효과적인 열전달이 이루어져야 하기 때문에 재료 및 복사열 전달과 관련된 여러 가지 첨단 지식을 필요로 한다. 흡수장치는 사용되는 작동유체 즉, 흡수된 열원을 발전장치로 이동시키는 열전달 유체의 종류에 따라 각각의 장치 특성에 최적화된 서로 다른 형상을 가지게 된다. 열전달 유체는 획득가능한 온도 및 발전방식에 따라 오일(oil), 포화수증기, 공기, 용융염 등의 다양한 물질이 사용되며 때로는 열전달 매체 없이 직접 외연기관을 구동하여 전기를 생산하기도 한다.

태양열발전을 위한 발전장치는 내연기관을 제외한 기존의 화석연료 발전방식의 경우와 동일한 장치를 사용한다. 랭킨(Rankin)사이클에 기초한 스팀터빈 발전기는 가장 일반적인 발전 장치로서 구유형 및 타워형 집광장치와 연계되어 대규모 태양열발전엔 널리 사용되고 있다. 보다 고온의 집광이 가능한 타워형 혹은 접시형 집광장치에는 가스터빈을 이용한 발전도 가능한데 이 경우 사이클의 특성상 발전은 순수하게 태양열만을 이용하지 않고 일정 정도의 화석연료가 함께 사용된다. 또한 바이오메스를 이용한 발전 등의 분야에서 새로이 주목받고 있는 스테링 엔진도 접시형 집광장치와 연계하여 태양열발전을 행하는 주요한 발전장치로 사용되고 있으며 이는 소규모 태양열발전을 위한 가장 효과적인 방법으로 응용되고 있다.

태양열발전의 분류

태양열발전은 사용되는 집광방식에 따라 발전의 규모, 발전의 방식, 열전달 방식 등이 달리 적용되는 관계로 일반적 분류는 집광방식에 따라 이루어진다. 즉, 집광방식과 동일하게 태양열발전은 구유형, 타워형, 그리고 접시형으로 구분될 수 있는데, 최근에는 열에너지 전달 방식, 발전방식 등에 많은 기술적

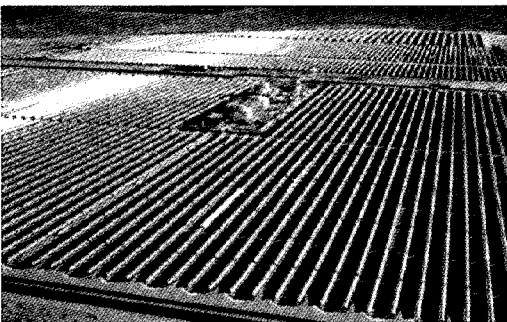
진보를 이루어 집광방식과 함께 이들 세부 요소기술의 명칭이 태양열발전을 분류하고 명명하는데 함께 사용되기도 한다. 예를 들어, 용융염을 열전달 매체로 적용한 타워형 집광 방식의 태양열발전설비는 Molten Salt Power Tower로, 스텔링 엔진을 적용한 접시형 태양열발전설비는 Dish-Stirling System으로 불릴 수 있다. 그러나 적용되는 세부 기술이 시스템 별로 다소 상이할 지라도 구유형, 타워형, 그리고 접시형으로 분류되는 태양열발전의 형

식은 태양열발전 분야(CSP : Concentrating Solar Power)를 정의하고 평가하는 일반적인 분류방법이며, 각각의 방식은 고유의 특성과 한계를 동시에 지니고 있다.

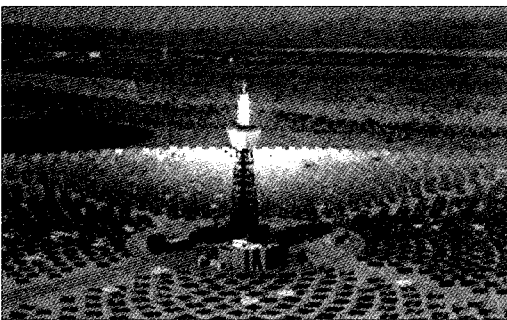
먼저, 구유형 태양열발전은 (현재까지는) 가장 낮은 비용으로 발전설비를 구축할 수 있다는 이점으로부터 수백 MW급 대규모 태양열발전설비에 널리 사용되는 발전 방식이다. 그러나 획득온도의 한계, 높은 열손실, 오일 등 사용되는 열전달 매체의 특성, 스팀터빈에 기초한 발전의 한계 등으로 인해 10%대 초반의 낮은 효율(태양복사에너지 대비 생산전력)의 운전이라는 한계를 가지고 있다.

타워형 태양열발전은 고온의 획득이 가능한 대규모 발전시스템이라는 특징을 가지고 있다. 발전사이클의 효율은 온도가 높아질수록 증가하는 관계로 보다 높은 효율의 발전이 가능하며, 구유식 발전과 비교하여 열손실의 여지가 적으며 무엇보다도 집광과 발전장치 사이에 열에너지를 저장시스템을 적용코자 할 경우 높은 온도차로 인해 보다 높은 밀도의 열에너지 저장이 가능하다는 이점을 가지고 있다. 이러한 이점들은 타워형 태양열발전설비의 경제성 획득에 유리함을 제공하는 주요 인자가 될 수 있다. 그러나 수백, 수천의 반사경이 모두 개별적으로 태양을 추적해야하기 때문에 이를 위한 추가 비용, 유지·보수의 문제, 그리고 고온의 열원을 흡수하고 전달하기 위한 장치의 개발 및 열매체의 선정문제 등 문제점 또한 가지고 있다. 이러한 연유로 타워형 태양열발전설비의 규모는 약 10MW 내외에 머물고 있으며 효율은 현재 구유형보다 약간 높은 정도를 보이고 있으나, 이러한 발전방식이 시범운전 단계이고 기술의 진보가 최근 빠르게 이루어지고 있는 점을 감안할 때, 향후에는 가장 경제성 높은 효율적 발전이 가능한 발전방식이 될 것으로 예측되고 있다.

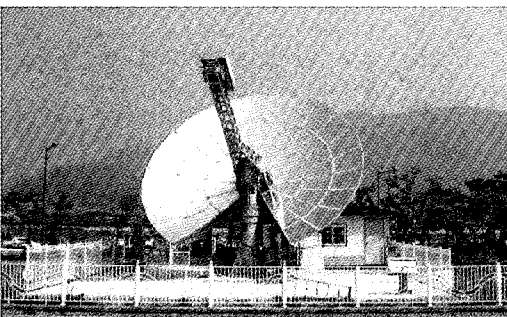
접시형 태양열발전의 특징은 작은 규모의 장치로부터 높은 효율의 발전이 가능하다는 점이다. 접시형 태양열발전 시스템은 일반적으로 태양을 추적하는 접시형 반사경으로 이루어진 집광기에 외연기관인 스텔링 엔진을 장착한 장치를 의미하는데, 최고 30%에 육박하는 높은 효율을 구현할 수 있다. 이 때



대규모 구유형 태양열발전 설비(미국 캘리포니아 소재)



대규모 타워형 태양열발전 설비(Solar Two 로 명명 ; 미국 캘리포니아 소재)



10kW 급 Dish-Stirling 태양열발전시스템(진해시 해상과학공원 내 구축 중)

스터링 엔진의 고온부는 접시형 집광장치에 의해 모아진 태양광으로 직접 가열하거나, 고온 히트파이프 등의 중간 열전달장치를 이용하여 가열하기도 한다. 이러한 발전 방식은 수~수십 kW의 소형(독립형) 발전에 효과적으로 사용될 수 있다. 단점으로는 대량 생산이 이루어지기 전까지는 제작비용의 절감을 기대하기 어렵다는 점과, 대형 발전설비를 구축하려할 경우 다수의 소형 시스템을 연계해야 한다는 점이다. 또한 이러한 발전 방식에 적합한 규모와 성능의 스토링 엔진을 개발하고 장시간의 안정적인 운영을 가능토록 내구성을 향상시키는 노력이 필요하다.

열에너지 저장 및 복합발전

태양에너지를 활용하는 모든 응용분야는 계절, 시간 및 기후조건에 따른 에너지 공급의 불균일성이라는 한계를 가지고 있다. 일정한 규모의 지속적 에너지 공급을 불가능하게 하는 이러한 한계는 태양에너지 활용에 있어 가장 큰 걸림돌 중의 하나이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 다양한 형태의 에너지 저장장치를 필요로 하게 되는데, 열에너지를 활용코자 할 경우 열저장장치를, 전기에너지를 활용코자 할 경우에는 전기저장을 위한 배터리를 요구하게 된다. 이러한 측면에서 태양열발전은 기존의 태양에너지 전기 생산 방법인 태양광발전시스템과 비교할 때에 보다 유리한 위치를 점하고 있다. 즉, 태양열발전은 열을 이용하여 발전을 행하는 관계로 태양광을 전기로 직접 전환시키는 태양광발전 시스템이 고가의 배터리 이외에 에너지 저장을 위한 별다른 방법이 없는 것과 달리, 열에너지 형태의 저장이라는 저비용 기술의 적용이 가능하다는 이점을 가지고 있다. 열에너지의 저장은 동일한 양의 생산전기를 기준으로 전기저장의 경우에 비해 약 1/20의 저비용 에너지 저장이 가능하다고 한다. 따라서 장치의 특성상 별도의 열에너지 저장장치를 사용하지 않은 접시형 발전방식을 제외한 모든 태양열발전 장치(solar only system)는 열에너지 저장장치를 가지고 있다. 이러한 열에너지 저장은 단지 안정적인 발전을 가능토록 하는 것 이외에도 발전 사이클을 최대 용량이 아

닌 최적 규모로 설계할 수 있다는 장점과 최적의 조건을 지속적으로 유지하며 발전을 행할 수 있다는 측면에서 태양열발전의 경제성을 끌어올릴 수 있는 가장 중요한 요소기술 중 하나로 여겨지고 있다. 일반적으로 태양열발전시스템의 성능을 나타내는 수치는 두 가지인데 하나는 발전효율 즉, 태양복사에너지가 전기로 전환되는 효율이며, 다른 하나는 연평균 가동률(annual capacity factor)로서 이는 저장 시스템의 용량에 의해 결정되는 수치이다. 따라서 고밀도, 저비용의 고온 열에너지 저장장치의 개발과 적용은 태양열발전에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 열에너지의 저장을 위해서는 액체나 혹은 고체(혹은 혼합물)형태 물질의 온도차를 이용한 현열(sensible heat) 축열 방법이 일반적으로 사용되고 있는데, 현재까지 검증된 가장 진보된 방법은 용융염을 이용한 열저장으로 타워형 발전 방식에서 성공적으로 검증된 바 있다.

태양에너지 공급의 불균일성을 극복하기 위한 또 다른 대안은 별도의 화석연료를 함께 사용하는 복합발전이다. 소극적인 의미에서 복합발전은 열원의 추가공급을 위해 별도의 보일러를 추가로 장착하여 운전하는 형태이나 보다 적극적 의미에서의 복합발전은 기존의 화석연료 발전시스템에서 폐열을 회수하여 추가의 발전을 행하거나, 온도별로 다단계의 발전 사이클을 연계하여 사용하는 경우와 유사하게 태양에너지에 의한 열원의 공급을 화석연료 발전시스템과 연계하는 방법이다. 또한 복합발전의 다른 형태로 화석연료의 열함량 증가를 위한 흡열반응의 열원으로 태양열을 이용하고 개질된 연료를 발전을 위한 연료로 사용하거나, 가스터빈 발전을 위한 압축공기를 태양열로 가열하는 방법, 바이오 가스나 천연가스의 연소와 태양열 흡수가 동시에 이루어지도록 하는 특별한 구조의 복합기를 적용하는 방법 등도 사용되고 있다.

태양열발전 기술의 현황 및 전망

태양열을 이용한 발전기술은 오일쇼크 이후 미국 등 선진국을 중심으로 수십 년 간 개발되고 많은 수의 시스템이 실증되어 그 기술적 타당성에 관한 검증

이 완료된 상태이다. 예로 미국의 캘리포니아 지역에 설치된 9개의 구유형 발전설비는 '85년 이후 80억 GWh의 전기를 남부캘리포니아 계통으로 전송한 바 있다. 보다 효율적이고 경제적인 대규모 발전이 가능할 것으로 기대되는 타워형 발전 설비는 '80년대 후반 운전을 완료한 1세대 시스템에 이어 '90년대에는 새로운 열전달 매체 및 저장 방법을 적용한 2세대 시스템을 성공적으로 개발, 시운전을 완료한 한 상태이며 현재는 동일 기술을 보완 적용한 15MW급 상업발전시스템을 유럽에 구축 중이다. 접시형 발전 시스템은 미국, 독일, 호주 등 여러 국가의 연구팀에 의해 다양한 형태와 규모로 개발 되고 시운전 되었으며 이를 위해 필요한 엔진의 개발과 함께 상용화를 위한 시도들이 앞다투어 진행되고 있다.

세계적으로 2010년까지 구축이 계획된 태양열 발전 설비의 규모는 약 2GW를 상회하는 것으로 알려져 있다. 그러나 자원고갈에 따른 신재생에너지 활용의 요구가 높아지고 있는 추세와 특히, 중국의 경우 별도로 대규모 태양열발전설비의 구축을 서두르고 있는 점을 감안할 때에 그 규모는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 태양열발전 분야의 전망 의하면 약 2020년경 구유식 태양열발전 시스템은 약 16% 정도의 효율 획득이 가능할 것으로 예측하고 있으며, 특별히 타워형 태양열발전 시스템의 경우 단일 시스템의 발전용량은 약 200MW급, 효율은 약 20%, 그리고 연평균 가동률은 75% 이상을 목표로 하고 있다. 이러한 기술개발이 성공적으로 이루어질 경우 태양열발전에 의한 생산전력의 단가는 현재의 15~20cent/kWh 수준에서 5cent/kWh 수준으로 낮아져 화석연료에 의한 상업발전과 대등한 정도의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

한편, 국내의 경우는 1990년대 중반부터 소형

태양열발전을 고려한 고효율 집광시스템의 개발에 관한 연구를 수행해 온 바 있으며, 최근에는 10kW 급 발전을 위한 접시형 집광시스템의 개발을 완료하고 스테링 엔진을 장착한 태양열발전 실증연구, 태양열 화학반응과 가스터빈을 연계한 복합발전, 바이오 가스를 병행 사용하는 복합발전 등에 관한 연구를 수행하고 있다. 또한, 중국 내 사막지역에 MW급 대규모 태양열발전 시스템을 구축코자 하는 국제 공동연구를 한 중 양국이 공동으로 기획하여 추진을 앞두고 있다.

분석에 의하면 지구상 전체 사막지역의 1% 면적에 일사되는 태양에너지는 현재 수준의 전환효율을 고려하더라도 전 세계의 전력수요를 모두 충당할 수 있는 막대한 량에 이르는 것으로 알려져 있다. 태양에너지는 화석연료의 대안으로 무한한 보유량을 가지는 유일한 신재생에너지 자원이며, 기존 기술들이 지니고 있는 한계와 진보의 정도를 고려할 때에, 태양열발전은 멀지 않은 미래에 가장 경제성 있는 신재생에너지 활용기술의 하나가 될 것이 분명해 보인다.

우리나라의 경우, 태양에너지 공급의 량과 밀도는 사막과 같은 고밀도 일사지역(sun belt)의 약 70% 수준으로 태양열발전을 행하기에 부족하지 않은 것으로 분석되고 있다. 또한, 관련 기술을 선도하고 있는 독일 등 선진국은 자국이 개발한 기술을 이용하여 스페인이나 북아프리카 등 고밀도 일사지역에서의 발전플랜트 건설을 주도하고 있는데 이는 국내의 태양열발전분야가 나아가야 할 좋은 본보기가 될 수 있을 것이다.

고유가와 기후변화 협약 등 대내외적인 환경변화가 현실화되고 있는 요즘, 미래의 에너지 안보 확보를 위한 전략적 판단과 투자가 시급한 시기임을 잊지 말아야 하겠다.

기계용어해설

열영동(Thermophoresis)

여러 물리적 조건의 구배에 의해 작은 콜로이드 등이 현상의 일종으로 온도 구배에 의해 발생한다. 유체와 고체간의 계면에서 발생하는 유동에 의해 생성되며 여과, 침전, 화학증기증착(CVD) 등의 응용 분야가 있다.