

태양열발전 기술개발 동향

김 종 규

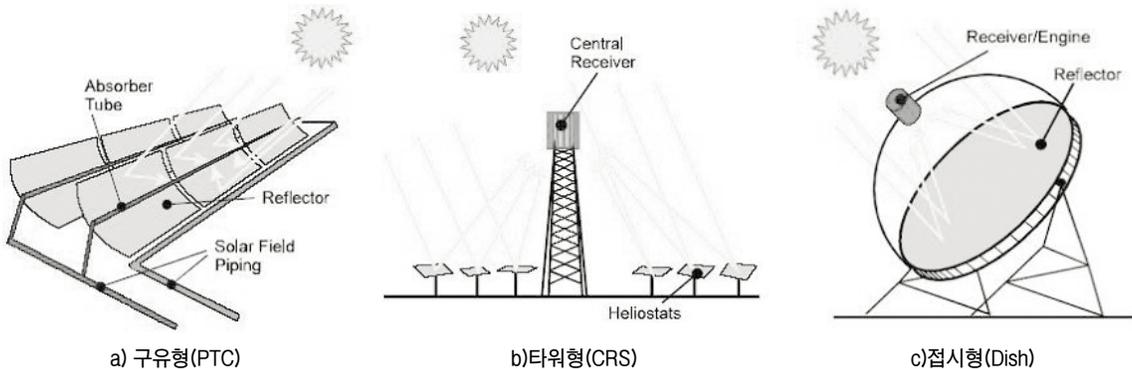
한국에너지기술연구원 선임연구원

1. 태양열발전이란?

태양의 일사량을 이용한 전력생산을 쉽게 태양열발전이라고 할 수 있다. 하지만 태양의 일사량은 낮은 에너지 밀도를 가지고 있으므로 전력을 생산하기 위한 열원으로써 활용하기 위해서는 에너지 밀도를 높여야 한다. 우리는 이미 그 방법을 잘 알고 있는데, 돋보기의 원리가 그 해답이 될 것이다. 태양열 발전을 CSP라고 한다. 이는 Concentrated Solar Power의 이니셜로서 태양열발전의 원리를 잘 설명하고 있는데, 집광을 통하여 에너지 밀도를 높여 발전을 위한 열원으로 활용하는 것이다. 즉, 태양열발전은 넓은 영역에 도달하는 태양의 일사성분 중 태양으로부터 직접 도달하는 직달일사성분을 반사 및 집광시켜 한

곳에 모인 높은 열원을 활용하여 전력을 생산하는 발전방식으로 3가지 대표적 태양열발전 방식을 그림 1에 나타내었다.

구유형(PTC, Parabolic Trough Concentrator)은 긴 포물선 형태의 반사면에 도달하는 태양광을 작동유체가 흐르는 관형태의 흡수기로 반사/집광시켜 열을 전달하는 형태로서 한 축으로 태양을 추적한다. 이와 달리 타워형(CRS, Central Receiver System)은 두 축으로 태양을 추적하는 여러 대의 반사체(Heliostat)가 타워(Tower) 상부로 태양광을 반사/집광시켜 흡수기에서 열을 회수하는 방식이다. 접시형(Dish)은 접시형태의 집열기에 도달하는 태양광이 반사되어 모이는 곳에 외연기관인 스텔링엔진(Stirling Engine)을 설치하여 전력을 발생시키는 방식으로 Dish-



[그림 1] 태양열발전방식

Stirling시스템이라 한다.

일반적으로 구유형과 타워형은 흡수한 열을 이용하여 주로 증기터빈을 구동하여 전력을 생산하기 때문에 증기발전기, 탈기, 냉각타워 등 기존 화력발전의 구성기기를 사용하게 되며 대용량 발전방식에 적당하다. 접시형은 단위 시스템이 태양을 추적하는 접시형태의 구성기기로서 분산발전에 적합한 소형시스템이다. 각 발전방식별 성능 및 특성을 표 1에 나타내었는데, 발전형식에 따른 집광비가 다르며 이에 따라 발전효율(Solar-to-Electricity)도 달리 나타나고 있다. 접시형은 집광비가 높아 고온의 열을 얻을 수 있어 높은 전기전환 효율을 기대할 수 있으나 제작비가 다른 시스템에 비해 비싸며 스티어링엔진(Stirling Engine)의 상업화가 필수적이다. 구유형은 1987년부터 상업발전을 시작하여 현재 전 세계적으로 상업용 태양열 발전시스템의 대부분을 차지하고 있으며 기존의 가스터빈(Gas Turbine)과 폐열회수 보일러(HRSG)를 이용하는 복합발전(Combined Cycle)과 함께 연계하여 이용하는 형식으로 그 활용성을 높여 가고 있다. 실제 북 아프리카 지역

의 이집트, 알제리, 모로코에서는 태양열 발전과 화력발전 복합사이클을 함께 이용하여 발전용량을 증가시키거나 화석연료의 사용을 저감하고자 계획하고 있다. 그러나 1개의 축에 의한 태양추적 방식에 의한 집광특성에 따라 고온의 열을 얻는데 제약이 있어 발전시스템의 효율을 높이기에는 한계가 있다. 이에 반하여 타워형은 2축으로 태양을 추적/반사하므로 구유형에 비하여 높은 열을 얻을 수 있고 이를 통하여 증기터빈(Steam Turbine) 유입 증기 온도 및 압력을 높일 수 있다. 이는 발전시스템 측면에서 전체 시스템 효율을 증가시킬 수 있기 때문에 미래 태양열 발전시스템 형식으로 주목받고 있다.

2. 태양열발전의 구성

앞서 언급한 것과 같이 태양열발전 시스템 중 구유형은 이미 80년대부터 상업발전을 시작하여 현재 전 세계적으로 주고 건설되고 있는 발전방식이며 타워형은 2007년 상업발전에 진입하였으나 향후 개발가능성 등을 고려하여 다양한 연구가

<표 1> 발전방식별 성능 및 특성

구분	발전규모 (MWe)	집광비	최대 효율 (%)	연간 효율 (%)	부지사용 (m ² /MWe/y)
구유형	10 ~ 200	70 ~ 80	21	17 ~ 18	6 ~ 8
타워형	10 ~ 150	300 ~ 1000	20	15 ~ 25	8 ~ 12
접시형	0.01 ~ 0.025	1000 ~ 000	31	18 ~ 23	8 ~ 12

<표 2> 태양열발전 방식 및 구성에 따른 적용기술

발전방식	집광방식	흡수방식	발전방식	저장방식
구유형	Parabolic Trough Concentrator	Oil / Steam	Steam Turbine	Molten Salt
타워형	Heliostat-Tower	Water/Steam	Steam Turbine	Steam Molten Salt etc.
		Air	Gas Turbine	
		Molten Salt	Steam Turbine	
접시형	Parabolic Dish Concentrator	He	Stirling Engine	없음
		H ₂		

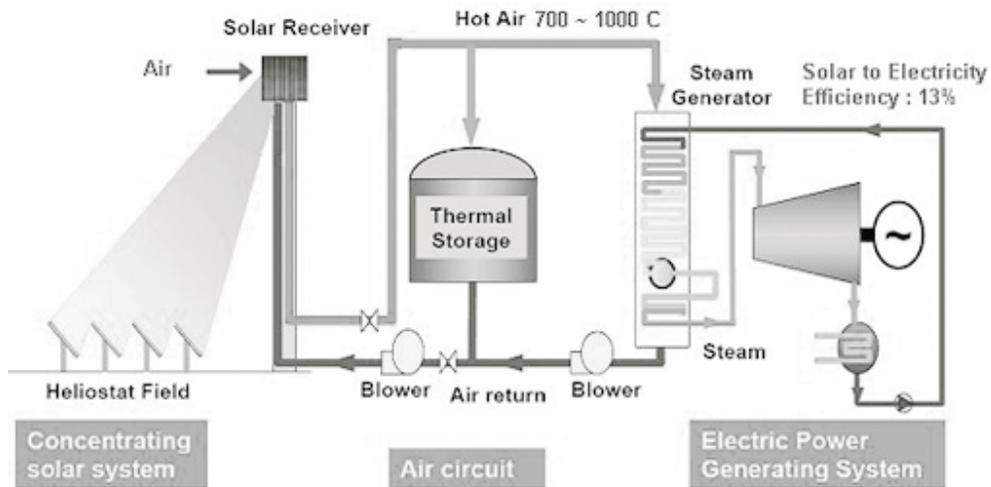
진행 중인 발전방식이다. 이에 태양열발전 기술동향에 대해서 주로 타워형과 관련하여 언급하도록 하겠다. 태양열발전 시스템은 그림 2와 같이 열원으로서 태양광을 추적하여 반사 및 집광하는 시스템과 열원을 흡수하여 증기를 생산하는 시스템, 그리고 증기를 이용한 발전시스템으로 구성할 수 있으며 이중 태양광으로부터 열원을 모으는 집광 시스템을 제외 하곤 나머지는 화력발전과 유사하다고 할 수 있다. 또한 태양열을 이용하면서 발생하는 지속적인 에너지 공급문제를 해결하기 위하여 일사량이 높은 시간에 열을 저장하여 일사량이 낮거나, 없는 시간대에 발전에 사용하기 위한 열저장시스템이 추가로 필요하게 된다. 따라서 태양열발전 기술은 태양추적 및 집광, 흡수기, 열저

장기 기술과 이를 발전시스템과 연계하는 기술이라 할 수 있다. 태양열발전 방식 및 구성에 따른 적용기술을 표 2에 나타내었는데, 이중 타워형 발전시스템의 흡수방식 관점에서 태양열발전의 기술 동향에 대해 기술하겠다.

3. 국외 태양열발전 기술 동향

3.1 Water/Steam 이용방식

태양열발전은 70년대 원유과동으로 인하여 표 3과 같이 미국, 일본, 프랑스, 스페인 등에서 1980년대 초에 MW급 실험용 타워형 플랜트를 건설하였으나 이후 원유가 하락으로 그 필요성이 줄어들어 따라 미국, 독일 등 몇몇 나라에서 연구



[그림 2. 태양열발전시스템 구성(공기식)]

<표 3> 실험용 타워형 발전플랜트

프로젝트	작동유체	용량(MWe)	국가	운전시작연도
SSPS	Liquid Sodium	0.5	Spain	1981
EUROLIOS	Water/steam	1	Italy	1981
SUNSHINE	Water/steam	1	Japan	1981
Solar One	Water/steam	10	USA	1982
CESA-1	Water/steam	1.2	Spain	1982
THEMIS	Hitec Salt	2.5	France	1984

를 진행해 오다 현재 고유가 및 지구온난화 문제로 인하여 다시 활발한 연구가 진행되고 있다. 타워형 태양열발전시스템 개발 초기 표 3과 같이 작동유체로서 물/증기를 사용한 프로젝트가 대부분이었다. 이는 초기 태양열발전시스템이 랭킨사이클(Rankine Cycle)을 적용하여 증기터빈을 구동하기 위한 증기를 흡수기에서 직접 생산하여 터빈으로 공급하는 개념으로 접근한 결과로서, 대부분이 흡수기 출구 증기로 과열증기를 생산하였다. 즉, 타워 상부에 설치되는 흡수기로 물을 흘려보내 증기를 생산하는 방식으로 일반 화력발전의 보일러와 유사한 형태를 보이며 단지 외부 열원을 받기위해 개방되어 있을 뿐이다. Solar One 발전시스템은 10 MWe 출력으로관류형(Once-Through)의 흡수기 형식으로 출구 증기조건은 10.1 MPa, 516℃이다. 또한 CESA-1은 1.2 MWe급 태양열 발전시스템으로 11 MPa, 525℃의 과열증기를 생산하였다. 그러나 태양열 발전시스템의 특성상 흡수기의 증발기와 과열기 모두 집광된 태양복사광에 노출 되는 문제로 인하여 과열기의 파손 및 온도 제어 측면에서의 어려움으로 흡수기의 안정적인 운영에 어려움이 있었다.

2007년 스페인에 세워진 최초의 타워형 상업용 태양열발전시스템인 그림 3의 PS-10에서는 흡



[그림 3] PS-10 타워형 태양열발전 플랜트

수기 출구증기 조건이 40 bar, 250℃인 포화증기를 생산하여 11 MWe의 전력을 생산하고 있다. 이와 같이 포화증기를 생산함으로써 과열기의 손상 및 제어상의 문제점으로 인한 흡수기 및 전체 플랜트의 수명단축 등의 문제를 제거하여 낮은 발전효율 측면에서의 단점이 있지만 최초의 상업 발전으로서의 이용률 및 수명 측면에서 유리한 점이 있다고 보여진다. 이러한 관점에서 현재 포화증기를 사용하여 20 MWe급 발전용량의 PS-20가 건설중에 있다. 그러나 발전플랜트의 효율을 높이기 위해서는 과열증기를 이용한 증기터빈 운전이 필수적이므로 이에 대한 연구가 계속되고 있다. 이스라엘의 경우 50 ~ 100 MWth 용량의 LUZ II 태양열발전 플랜트 개발을 위해 약 4.5 MWth 용량의 과열증기 생산용 소규모 흡수기에 대한 연구를 우선 진행하고 있는데, 과열기의 과열 및 제어상의 문제점을 해결하기 위하여 증발기와 과열기를 분리해서 타워의 다른 높이에 설치함으로써 별도의 반사체가 과열기로 열량을 보낼 수 있도록 개발하고 있다.

3.2 Molten Salt 이용방식

흡수기에서 물/증기를 직접 생산하는 태양열발전방식인 경우 포화 또는 과열증기를 이용하여 열을 저장하고 필요시 이를 이용 다시 증기를 생산해야 하는데, 이러한 과정에서 열전달 손실이 발생할 뿐만 아니라 흡수기에서 직접 생성된 증기에 비하여 열저장기에서 생성된 증기의 조건이 낮아 발생하는 발전 효율 감소가 뒤따른다. 하지만 용융염(Molten Salt)을 흡수기의 작동유체로 사용하는 경우 열저장기의 저장 매체로 직접 활용할 수 있기 때문에 증기터빈으로 동일한 조건의 증기를 공급할 수 있게 되며 열저장기의 경우 한 번의 열교환을 통하여 증기를 생산할 수 있게 됨에 따라 저장기 효율을 증가시킬 수 있게 된다.

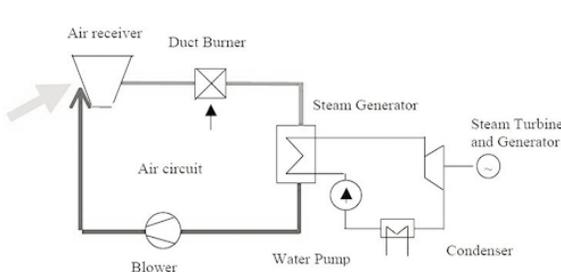
최초로 용융염을 사용한 태양열발전시스템은 프랑스의 THEMIS로서 용량은 2.5 MWth이며 이후 미국의 Solar One를 개조한 Solar Two의 경

우 상업화를 목적으로 용융염을 이용하였다. 이 발전시스템의 경우 직접 증기를 생산한 Solar One과 거의 동일한 조건의 증기(10 MPa, 450 °C)를 생산하였는데, 평균 430 kW/m², 최고 800 kW/m²의 높은 열유속에도 안정적으로 운전이 가능하였다. 이는 용융염을 작동매체로 사용할 경우 용융염과 물의 열교환을 통해 나오는 증기의 온도를 높일 수 있게 됨을 의미하는 것으로 발전효율 측면에서 유리하다. 그러나 용융염의 온도가 높아진다는 것은 흡수기 관 재질이 높아짐을 의미하는데 실제로 Solar Two의 운전 후 흡수기 관 재질로 니켈합금강이 추천되었다. 이와 더불어 용융염은 약 260°C 정도 온도에서 녹는점을 나타내므로 관내 용융염의 동결 방지를 위하여 별도의 열공급 장치(EHTC, Electric Heat Tracing System)를 설치하여야 한다. 현재 흡수기 작동유체로 용융염을 이용하여 상업운전을 계획으로 건설을 추진하고 있는 발전시스템으로는 스페인의 17 MWe급 Solar Tres가 있다. 이 시스템은 미국에서 개발한 Solar Two의 용융염 활용기술을 발전시켜 Solar Two 보다 3배 증가된 열용량을 확보하고 있는데, 16시간동안 운전이 가능한 열저장시스템을 보유할 예정이며 이는 하절기 24시간 발전이 가능하도록 하였다. 앞서 언급하였듯이 용융염을 이용할 경우 고온, 고압의 증기를 얻을 수 있으므로 전체 시스템의 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

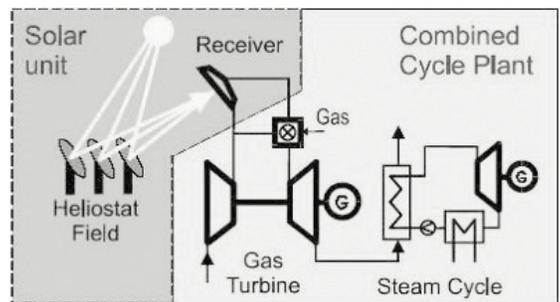
3.3 Air 이용방식

공기를 이용하는 흡수기(Volumetric Air Receiver)의 경우 그림 4와 같이 두 가지 형태의 발전시스템으로 활용할 수 있다. 그림 4 a)와 같이 공기의 온도를 높게 올려 이를 증기발생기와 열교환하여 증기를 생산하고 증기터빈을 가동하여 전력을 생산하는 방식과 높은 온도의 공기를 가스터빈에서 사용한 후 배가스를 다시 배열회수보일러에서 활용하여 발전하는 그림 4 b)와 같은 방식이 있다. 그림 4 b)의 방식은 태양열과 복합 발전을 연계한 경우로 그림 4 a)의 랭킨사이클만을 이용하는 것과 비교하여 높은 발전효율을 얻을 수 있어 독일, 프랑스, 스페인 등에서 연구를 진행하고 있으며 독일에서는 그림 4 a)와 같은 형식의 1.5 MWe급 태양열발전 플랜트를 건설하고 있다.

이러한 태양열발전방식에 있어 공기식 흡수기의 개발이 필수적이며 1992년 PHOEBUS 프로그램에서 2.5 MWth급의 TSA(Technical Program Solar Air Receiver) 발전시스템이 스페인에서 운전되었다. TSA의 경우 평균 300 kW/m², 최고 800 kW/m²의 열유속 조건하에 150°C 공기를 700°C로 승온시켰는데, 이를 이용하여 45 bar, 340°C의 과열증기를 생산하였다. REFOS 프로젝트의 경우 400 kWth용량의 흡수기를 15 bar의 압축공기를 순환시켰으며 흡수기 출구 온도를 800°C까지 올릴 수 있었다. 압축 공기를 사용함



a) 공기식 흡수기+스팀터빈.5



c)접시형(Dish)

[그림 4] 공기식 흡수기 활용 태양열발전시스템



[그림 5] 10kWe급 접시형 태양열발전시스템

으로서 가스터빈 운전에 활용코자 하였는데, 이후 SOLGATE 프로젝트에서는 REFOS의 흡수기를 활용하여 가스터빈과 복합으로 230 kWe급 전력을 생산하였다. SOLAIR 프로젝트는 최초의 타워형 발전플랜트인 PS-10을 공기식으로 건설하려는 계획 하에 진행하였는데, 3 MWth 용량으로 대기 중의 공기를 이용하는 공기식 (Open Volumetric) 흡수기 형식이다. 이 경우 입구 공기 온도는 20℃이고 출구 온도는 680 ~ 1000℃ 범위를 나타내었는데, 공기로의 열전달 효율은 약 80%를 보이며 400℃의 과열증기를 생산할 수 있었다.

4. 국내 태양열발전 기술 동향

국내의 경우 한국에너지기술연구원에서 1994년부터 태양열발전 관련 연구를 수행하고 있다. 연구 초기 구유형 반사체개발을 수행하였으며 2003년부터는 10 kWe급 접시형 집열기를 개발

하였다. 그림 5는 2007년 진해에 설치된 접시형 발전시스템으로 독일 SBP사의 10kWe급 스테어링 엔진을 장착하여 국내 최초로 태양열을 이용 전기를 생산하였으며 19.2%의 발전효율을 달성하였다. 현재는 스테어링엔진의 국산화를 위하여 기업체, 기계연구원과 함께 개발에 참여하고 있다. 또한 중국과의 국제공동과제로 1MWe급 타워형 태양열발전 플랜트를 건설하고 있으며 한국에너지기술연구원에서는 과열증기 발생용 물/증기형식의 흡수기와 열저장기를 개발하고 있다.

5. 결론

북아프리카 사막지역 1%에 태양열발전플랜트를 건설할 경우 세계 전력수요를 충족할 수 있다고 한다. 그만큼 태양열이 풍부한 자원이라는 얘기가 될 것이다. 미국은 캘리포니아 남부지역에 대규모 발전플랜트 건설이 이어지고 있으며 유럽은 스페인, 독일, 이스라엘 등 기술 강국을 중심으로 지중해 연안인 유럽남부, 중동, 북아프리카를 잇는 태양열발전 전력계통을 구상하고 있다. 그리고 태양열, 화력 복합발전 플랜트가 북아프리카에 건설되고 있다. 그러나 태양열발전은 아직 시작이다. 3가지 태양열발전 형식 중 하나는 2007년 시장이 문을 열었지만 구멍가게 하나 있는 것이고, 하나는 아직 시작조차 하지 않았다. 우리에게만 발전기술이라는 잘 다듬어진 기술이 있으며 태양열을 붙여 실습할 시간이 있다. 일사량이 좋지 않은 유럽의 기술 강국을 볼 때 국내 일사조건을 이유로 움츠러들 필요가 없다고 생각한다.

태양열발전시장은 국내 기술로 진출할 수 있는 신재생에너지 분야로서 과감한 투자와 그 결과가 기대된다.