

# 태양열 발전 기술 및 현황

■ 김 종 규 / 한국에너지기술연구원, rnokim@kier.re.kr

태양에너지를 열로서 활용하여 전력을 생산하는 태양열 발전 기술에 대한 국내외 현황을 소개한다.

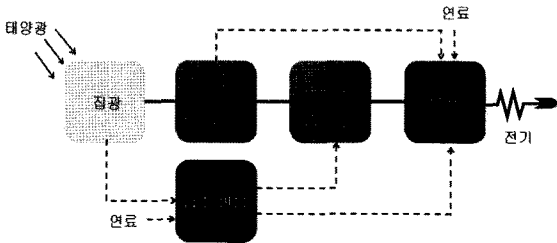
## 기본개념

태양열 발전은 태양에너지를 이용 터빈(또는 엔진)을 구동하여 전력을 생산하는 발전방식으로 정식 명칭은 집광형 태양열 발전(Concentrated Solar Power, CSP)이다. 태양의 일사강도는 매우 낮은 에너지 밀도를 갖고 있어 발전용으로 사용하기 위해서는 명칭에서 알 수 있듯이 태양광을 집광해야 하며 이를 통해 높은 열에너지를 얻을 수 있다. 이러한 열에너지를 이용하여 작동매체에 열을 전달하여 기존의 화력이나 원자력과 같은 발전시스템을 구동하여 전력을 생산한다. 그러나 태양에너지는 낮 동안만 사용할 수 있으며 이 또한 항상 일정한 일사량을 보이지 않는 특성이 있다. 이러한 열원의 특성을 고려하여 낮 동안 일사량의 변화 및 야간에도 일정한 전력을 생산

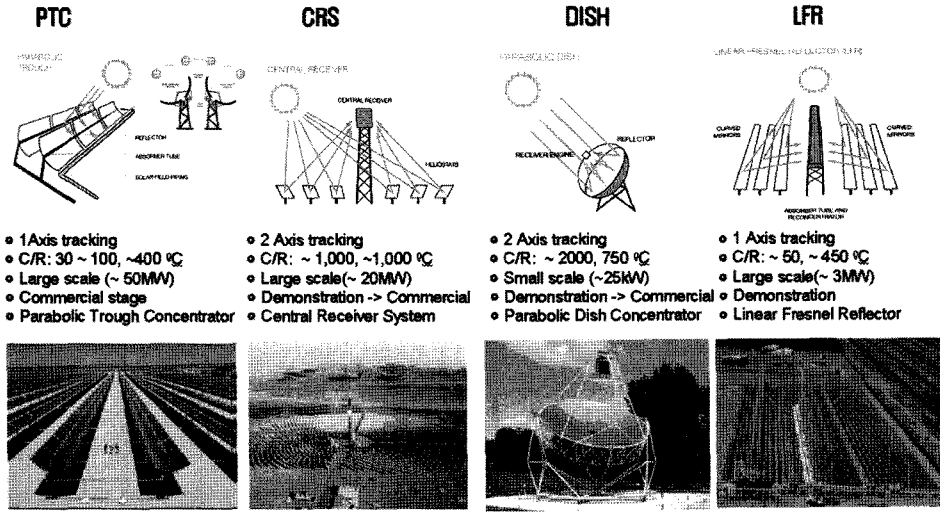
하기 위해서 태양에너지를 열로서 저장하여 발전에 활용하고 있다. 따라서 태양열 발전 플랜트는 그림 1과 같이 집광, 흡수, 저장, 발전의 4가지 기본 요소설비로 구성되어 있다.

## 발전종류

태양열 발전은 집광형식, 발전규모 및 방식 등에 따라 그림 2와 같이 크게 4종류로 나눌 수 있다. 접시형을 제외한 3가지 형태는 기본적으로 증기 터빈을 구동하는 대규모 발전에 적합하고 접시형은 최대 25 kW 용량으로 분산발전 형태이다. 상업적, 기술적 단계로 보면 구유형은 1980년대부터 상업발전을 시작하여 기술적으로 향상되어 있어 현재 태양열 발전 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 발전방식이다. 그 뒤 타워형이 2007년 최초의 상업 운영을 시작하여 현재 상업화 초기 상태로 볼 수 있다. 기술적으로는 구유형에 비해 개발여지가 많고 높은 온도를 올릴 수 있어 태양열 발전 플랜트의 발전효율을 향상시킬 수 있는 발전방식으로 주목받고 있다. 접시형은 최대 30%에 달하는 높은 발전효율이 가장 큰 장점으로 작용하나 가장 비싼 태양열 발전 형태로 엔진의 대량 생산에 따른 가격 절감이 상업화의 중요한 관건으로 작용하고 있다. 또한 구유형, 타워형, 프레넬형의 경우 열 저장기능을 가지고 있어 전력생산 시간을 확대할 수 있으나 접시형은 열 또는 전력 저장기능 없이 일사량에 따른 발전에만 의존한다.



[그림 1] 태양열 발전 구성

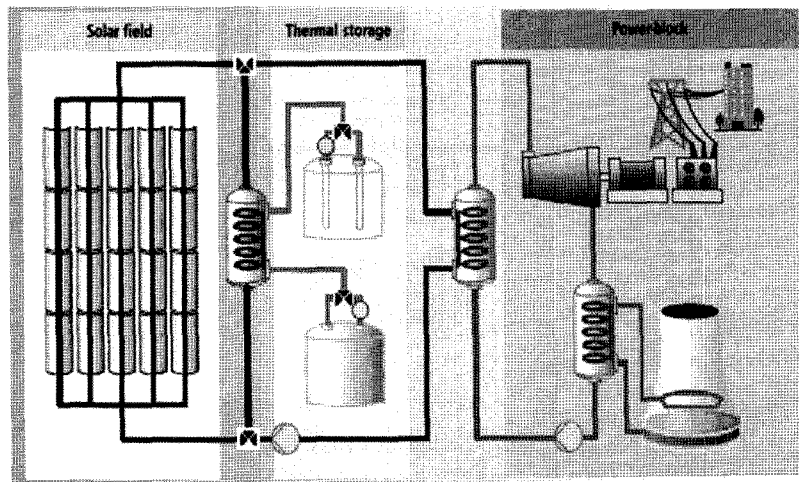


[그림 2] 태양열 발전 종류

### 구유형 발전

구유형(PTC, Parabolic Trough Concentrator)은 긴 포물선 형태의 반사면에 도달하는 태양광을 작동유체가 흐르는 진공관 형태의 흡수기로 반사/집광시켜 열을 전달하는 형태로 태양을 1축으로 추적한다. 일반적으로 흡수기의 작동유체로 합성오일(Syn-thetic Oil)을 사용하며 비등점인 400°C가 활용할 수 있는 최대 온도라 할 수 있다. 따라서 그림 3과 같이 물과 열교환하여 약 390°C 전후의 과열 증기를 만들어 발전에 사용하게 된다. 또한 열저장을 위해서 주로 용융염을 사용하는데, 용융염과의 열교환으로 고온 열저장조는 약 390°C, 저온 열저장조는 약 290°C의 온도를 확보하고 있다. 스페인에 설치되어 운전 중인 50 MW 발전규모의 Anda-sol-1 플랜트의 경우 여름철 24시간 발전이 가능하다고 알려져 있다.

이러한 구유형 발전은 최대 28%, 연평균 15% 정도의 발전효율(Solar-to-Electric)을 나타낸다. 향후 구유형 발전의 성능향상을 위해서 흡수기에서 직접 증기를 생산하는 방식(Direct Steam Generation, DSG)에 대한 연구를 진행하고 있으며 이탈리아에서는 작동유체를 오일대신 용융염을 활용하는 방식에 대해 파일릿 플랜트를 건설하여 연구 중에 있다.



[그림 3] 구유형 태양열 발전 플랜트 개략도 (자료: Solar Millenium)

### 타워형 발전

타워형(CRS, Central Receiver System)은 태양의 위치를 2축으로 추적하는 헬리오스타트(Heliostat)가 타워 상부에 설치된 흡수기로 태양광을 반사/집광시켜 열을 회수하는 방식이다. 흡수기에서의 작동유체로는 물/증기, 공기, 용융염(Molten Salt) 등이 사용되며 점 집광형태로서 집광비를 1,000 정도로 올릴 수 있어 구유형과 비교하여 높은 작동유체의 온도를 얻을 수 있다.

현재 3기의 상업발전 플랜트가 운전 중이며 10, 20, 17 MW 규모로서 10, 20 MW 발전 플랜트의 경우 40 bar, 250°C의 포화증기로 전력을 생산하며 증기저장(Steam Storage) 방식의 열저장기를 운용하고 있다. 그림 4에 10 MW 발전플랜트(PS-10)의 개략도와 사진을 나타내었다. 발전시스템을 고려하면 낮은 효율이 간단하게 구성되었는데, 이는 최초의 상업발전으로 플랜트 운전수명 동안의 안정적인 발전을 위한 조치로 이해할 수 있다.

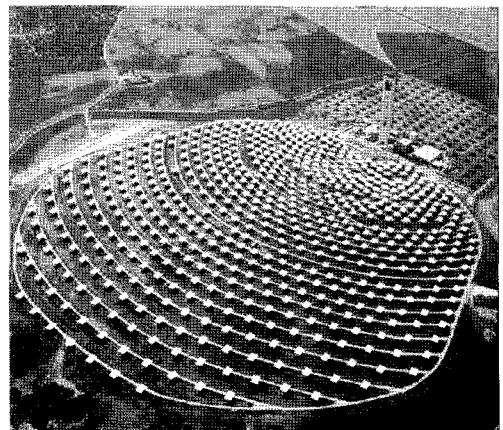
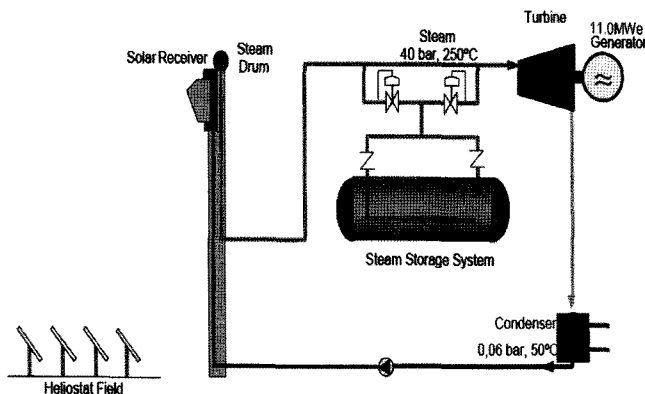
17 MW급 발전 플랜트(Solar Tres)의 경우 저장매체와 동일한 용융염을 작동유체로 활용하고 있으며 여름철 24시간 발전이 가능하다. 용융염을 작동유체로 이용할 경우 열전달 향상, 고온 현열 열저장 및 고온의 증기 생산 등의 장점이 많으나 약 260°C의 높은 녹는점으로 인해 배관 내에서 응고될 경우 이를 방지하기 위한 별도의 열공급 장

치가 필요하며 강한 부식성으로 인한 배관 재질 선정 그리고 용융염 펌프 등에 대한 추가적인 고려가 필요하다.

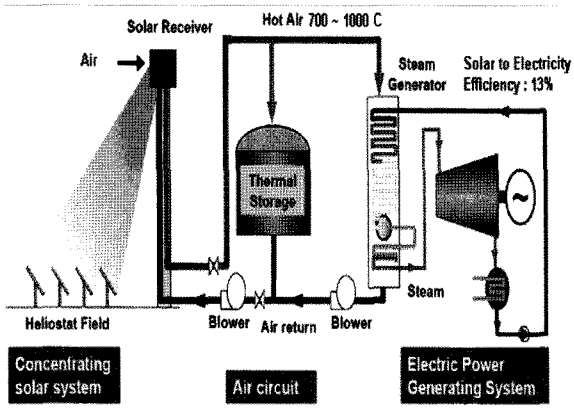
이 외에도 공기를 작동유체로 활용하는 태양열 발전 형태로 낮은 집광형태를 갖는 구유형에서는 적용할 수 없으나 높은 집광 형태인 타워형에서는 활용할 수 있다. 현재 공기를 이용한 발전방식은 2가지가 있는데, 그림 5 a)와 같이 상압의 공기를 유입하여 700 ~ 1,000°C 까지 올린 후 증기발생기를 통해 과열증기를 생산하고 발전하는 방식과, 그림 5 b)와 같이 가압된 공기 온도를 최대 1,000°C 까지 올려 가스터빈을 구동하고 폐열 회수보일러(HRSG)에서 증기를 생산, 발전하는 복합발전 이용 솔라-브레이튼(Solar-Brayton)방식이 있다. 모두 고온의 공기를 이용하므로 흡수기로 주로 탄화규소(SiC) 재질의 허니컴 형태를 사용한다. 이때 집광된 태양광이 허니컴의 온도를 높이면 허니컴의 미세 유로를 공기가 통과하면서 온도가 상승된다.

공기를 이용하여 증기터빈을 구동하는 경우 물을 이용하는 흡수기에 비해 일사량 변화 등 외부 환경에 따른 시스템 추종성이 좋아지며 안정적으로 과열증기를 생산할 수 있는 장점이 있고 열저장시 공기의 현열을 이용하므로 열저장기 시스템의 구성과 이용을 효과적으로 할 수 있게 된다.

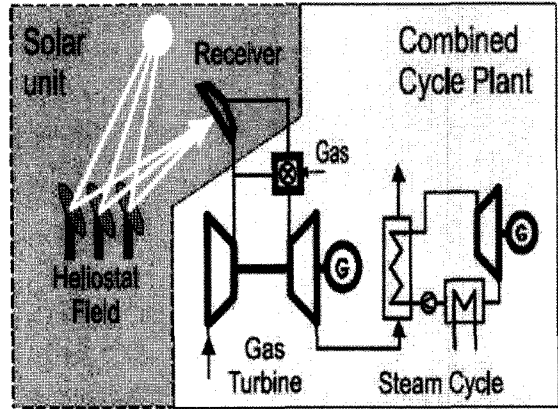
태양열 복합발전은 높은 발전효율을 접목하여



[그림 4] 10 MW 타워형 태양열 발전 플랜트(스페인 PS-10)



a) 공기식 태양열 발전



b) 솔라-브라이트 태양열 발전

[그림 5] 공기이용 태양열 발전 플랜트

태양열을 좀 더 효과적으로 활용하고자 하는 목적이 있으며, 특히 고 일사지역이 태양열 발전의 적용 지역임을 고려하면 물을 이용한 발전보다는 태양열과 가스터빈(또는 공기터빈)을 이용한 발전 방식의 적용이 타당하다는 관점에서 접근하고 있다.

### 접시형 발전

접시형(Dish-Stirling)은 접시형태의 집광기에 도달하는 태양광이 반사/집광되어 모이는 곳에 외연기관인 스텔링 엔진(Stirling Engine)을 설치하여 직접 전력을 생산하는 방식이다. 최대 2,000 정도로 집광되며 엔진의 흡수기를 통해 수소 또는 헬륨 등의 작동유체로 열이 전달되어 팽창에너지로 활용되며 엔진 내부의 발전기를 구동한다. 스텔링 엔진은 외연 기관으로 외부의 열원에 의해 전력을 생산하는 엔진으로 태양열 이외에 바이오 등을 이용한 발전 및 가정용 열병합 등으로 활용이 가능하여 국내외에서 개발이 활발히 진행되고 있다.

1990년대부터 접시형 태양열 발전시스템이 개발되어 실증운전을 수행하여 왔으며 현재 3, 10, 25 kW급 시스템이 상업운전을 준비 중에 있다. 이 중 그림 6 a)의 경우 최고 효율이 약 31%에 달하며 미국 서부 고 일사지역을 중심으로 수백 MW급의 대규모 상업 발전이 계획되어 있다. 그림 6 b)

는 최고효율 약 21%로 미국, 스페인, 독일 및 루마니아 등지에서 실증운전을 실시하였다. 미국 Infinia사에서는 엔진과 접시의 일체형 컴팩트한 3 kW급 접시형 발전시스템을 최근 개발되었으며 수 MW급 발전을 진행하고 있다.

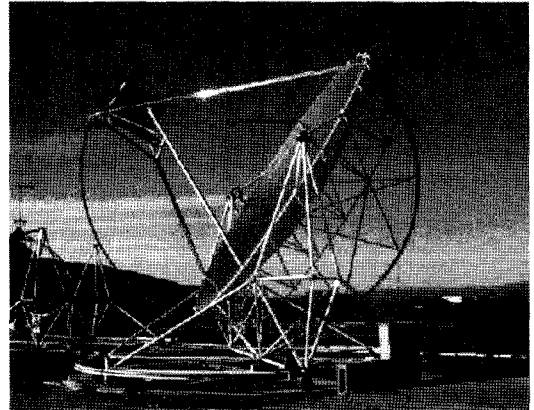
### 프레넬형 발전

프레넬형(Linear Fresnel Reflector) 태양열 발전은 구유형과 유사한 집광형태를 보이며 1축으로 태양을 추적한다. 그러나 그림 7과 같이 동일 높이 상에 폭이 좁고 긴 곡률을 가진 반사체를 설치하여 각각의 반사체가 태양을 추적하여 집광한다. 따라서 전체가 곡률을 이루어 집광하는 구유형 보다 집광비가 낮은 단점이 있으나 구유형 반사체의 회전에 따른 대규모 구동장치 및 고온, 고압 배관 연결의 유연성 확보와 회전 반경에 따른 추가적인 부지 면적에 대한 추가적인 비용이 낮아 가격 경쟁력이 있다. 무엇보다 흡수기의 작동유체로 물을 직접 이용하는 DSG 발전이 가능하여 과열증기 생산이 용이하고 이에 따른 발전효율 향상을 기대할 수 있다.

현재 미국의 Ausra, 독일의 Novatec BiosSol에서 각각 5, 1.4 MW급 실증 플랜트를 건설 및 운영 중에 있으며 1.4 MW급 플랜트에서는 35 bar, 270°C 정도의 증기를 생산하고 있다.

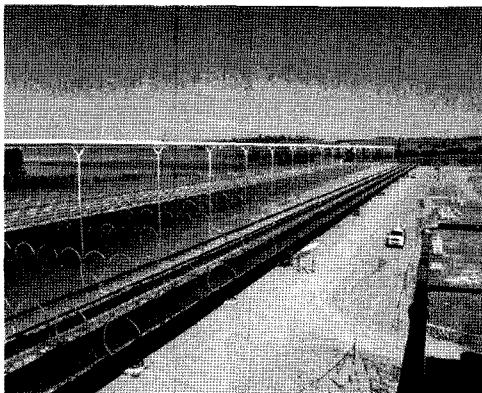


a) SES 25 kW

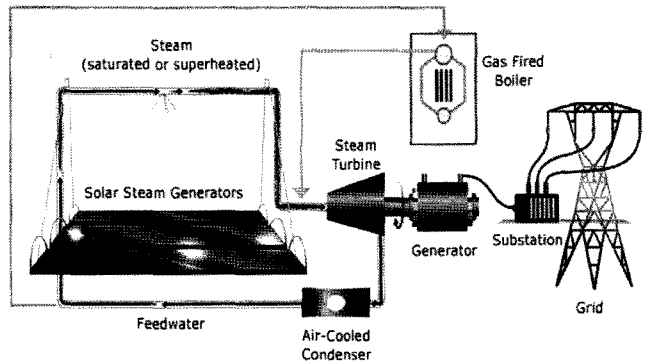


b) SBP 10 kW

[그림 6] 접시형 태양열 발전 시스템 프레넬형 발전



a) 프레넬 태양열 발전 플랜트



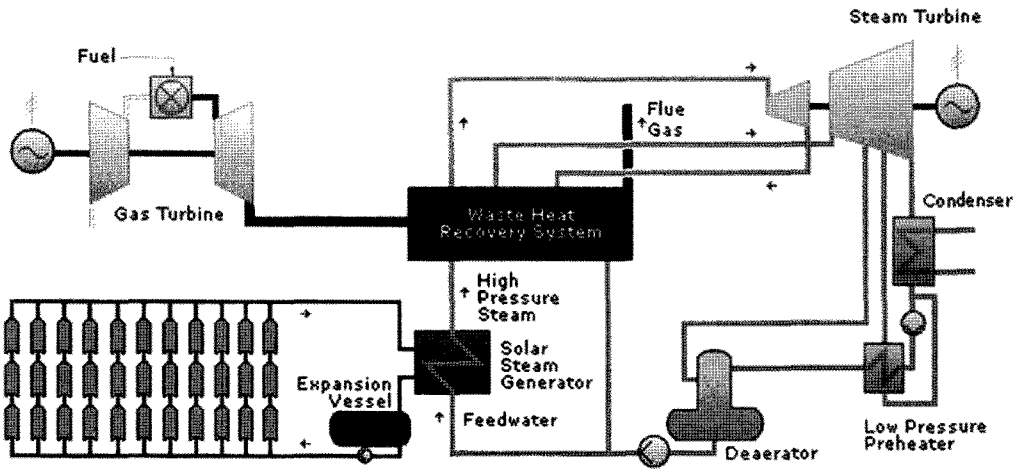
b) 프레넬 태양열 발전 개략도

[그림 7] 프레넬형 태양열 발전 시스템

### 태양열-복합발전 연계형 발전

북아프리카 지역에서의 태양열 발전 건설형태로서 그림 8과 같이 가스터빈의 배열을 이용하여 증기를 생산하는 폐열회수 보일러에서 유량의 일부를 태양열을 이용한 과열증기로 추가해주는 방식으로 태양열-복합발전 연계형(Integrated Solar Combined Cycle, ISCC)이라 한다. 따라서 태양열 발전은 기존 복합발전량을 증가시키거나 화석연료의 절감 효과를 가져올 수 있게 된다.

여기에 사용되는 태양열 발전 방식은 기술적으로 안정된 구유형이 주로 사용되고 있으며 복합발전에서 상시 발전이 가능하여 태양열 발전 플랜트에는 열저장기가 설치되지 않는다. 현재 모로코, 이집트, 알제리에서 건설이 진행 중이며 이집트의 경우 전체 150 MW 중 30 MW를 태양열에서 담당하고 있다. 향후 태양열 발전 기술의 발달에 따라 태양열에 대한 비중이 높아질 것으로 예상하고 있다.



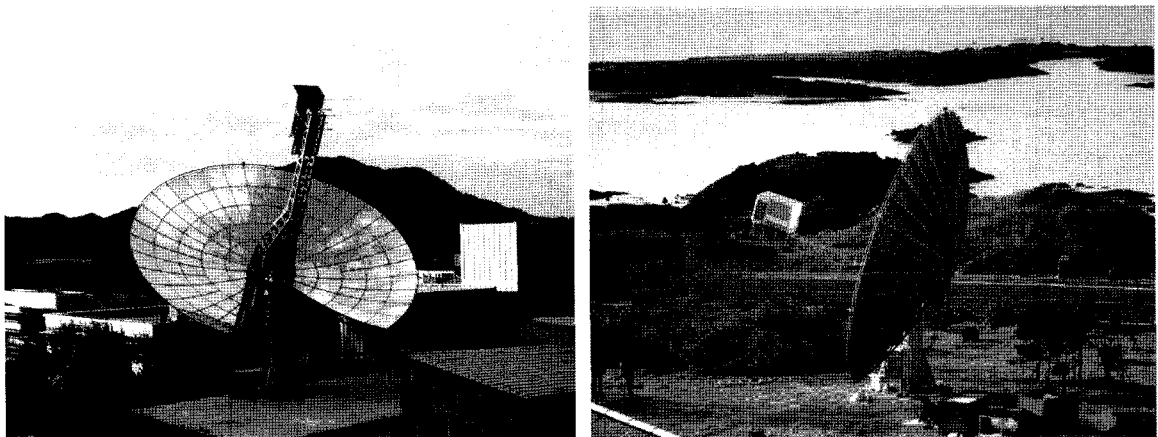
[그림 8] 태양열 - 복합발전 연계형 태양열 발전

### 국내 태양열 발전 현황

국내에서는 한국에너지기술연구원에서 1994년부터 구유형으로 연구를 시작하였다. 이후 접시형의 경우 1996년부터 연구를 시작하여 집광기 용량 증가에 따른 형상 변경을 거쳐 2007년 독일의 10 kW급 스텔링 엔진인 SOLO 엔진을 장착하여 전력을 생산하였다. 이후 그림 9와 같이 상업화 모델을 개발하여 현재 시범 보급사업을 진행 중에

있다.

대규모 태양열 발전 기술과 관련하여 2005년부터 중국과 국제공동 연구로 1 MW급 태양열 발전 기술개발을 진행하고 있으며 중국 북경 옌칭지역에 1 MW 발전 플랜트를 건설하고 있다. 한국에너지기술연구원은 과열증기 발생용 흡수기와 열저장기를 담당하고 있다. 국내에서는 대성에너지 주식회사를 중심으로 200 kW급 공기식 타워형 태양열 발전플랜트 기술개발 관련 연구개발이 진행 중

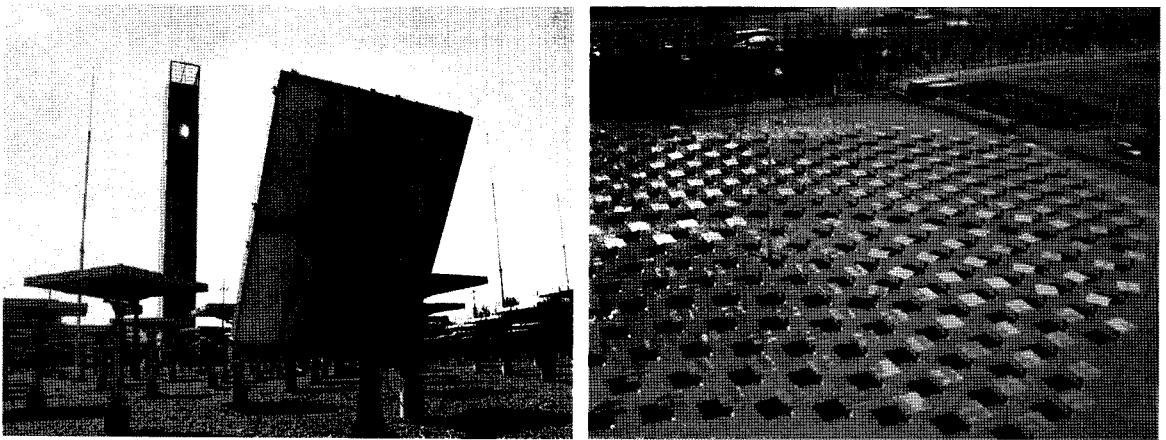


[그림 9] 접시형 태양열 발전 시스템

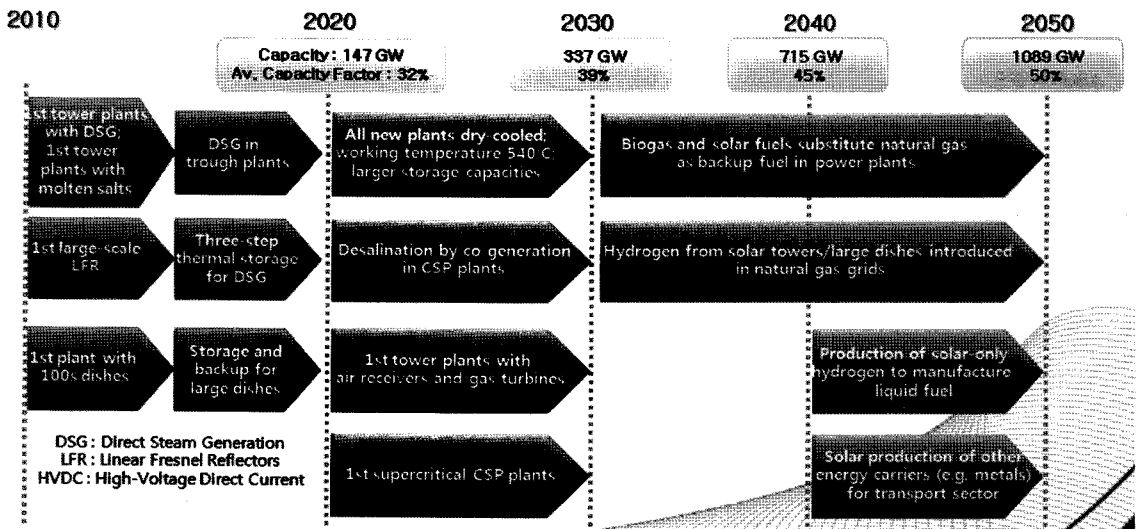
이며 차세대 태양열 발전 기술 개발을 목표로 2008년 시작되어 2011년 완공예정인 현재 그림 10과 같이 진행 중에 있다. 국내 최초의 태양열 발전 플랜트이며 완공 후 국내 태양열 발전연구의 테스트 베드(Test Bed)로 활용될 예정이다. 이 밖에 100 kW급 용량의 구유형 발전을 선다코리아에서 연구개발 중이며 나노씨엠에스(주)에서는 반사 거울의 반사율을 높이는 기술을 개발하여 국외 기업과의 협력을 통해 해외 진출을 모색하고 있다.

### 기술전망

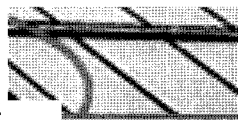
IEA의 태양열 발전 기술 로드맵 자료를 보면(그림 11 참조) 2020년대에는 축열 기능 확대, 고 일사량지역에서의 물 절감형 플랜트, 태양열 발전-열병합에 의한 해수 담수화, 초임계 태양열 발전 기술이 개발될 전망이고 2030년대 이후에는 태양열 발전 플랜트의 백업 연료로서 천연가스 대신 바이오가스 또는 태양연료를 사용하는 기술 및 태



[그림 10] 200 kW 공기식 태양열 발전 플랜트



[그림 11] 태양열 발전 기술 로드맵



양열 발전을 이용한 수소생산 기술 등이 개발될 전망이다.

2010년 기준 전세계 태양열 발전 플랜트의 보급 용량은 약 1 GW이며, 현재 진행 중인 프로젝트만을 고려할 경우 2015년에 15 GW로 증가될 예정이다. 향후 태양열 발전의 설치 용량에 대한 다양한 전망이 있는데, 2020년에는 30 ~ 60 GW 정도의 용량 확대가 예측되고 있다.

## 맺음말

태양열 발전 기술은 고 일사량 지역을 중심으로 시장이 확대될 것으로 예상하는데 이는 연간 일사량 기준으로 2,000 kWh/m<sup>2</sup>/y 이상이어야 경제성이 있기 때문이다. 이러한 이유로 국내에서의 기술개발에 대한 회의적인 시각이 있으며 기업의 투자 또한 저조하다. 더불어 태양광 발전의 가시적인 성장과 비교될 때가 많다.

하지만 태양열 발전은 터빈을 구동하여 전력을 생산하는 기술로서 고효율, 경제성 있는 발전을 위해서는 수십 MW의 대규모 발전이 요구되며 그

러한 방향으로 프로젝트가 이루어지고 있다. 이러한 이유로 태양열 발전 프로젝트 개발을 위해서는 막대한 초기 투자비가 소요되는 특징이 있어 프로젝트의 시작 및 시장 확대가 더더 보일 수 있는데, 이는 기술특성에 따른 시장과 기업의 성장과정이 태양광 발전과 다르기 때문이다.

그러나 지금까지는 스페인, 미국 중심의 시장이었다면 앞으로는 중동을 중심으로 한 고 일사지역에서의 태양열 발전이 주로 이루어질 것으로 예상되며 실제 이들 지역에서 기술에 대한 수요가 증가되고, 공동연구, 합작의 형태로 기술 선진국의 진출이 활발히 이루어지고 있다.

국내 기업의 경우 중동지역에서 건설, 발전, 담수 등 활발한 기업 활동을 진행하며 관련 기술을 확보하고 있다. 또한, 이들 국가와의 유대관계도 강하다고 할 수 있다. 태양열 발전 기술은 기존 화력발전 등의 기술, 토목, 건설과 접목할 수 있는 신재생에너지 분야로서 국내 기업의 참여와 투자에 따라 향후 이루어질 시장확대에 충분히 진입할 수 있다고 생각된다. 아직 태양열 발전 시장은 시작 단계이다. 