

# 태양열 발전 시스템의 종류 및 기술 동향

태양열 발전은 21세기를 대비할 수 있고 실용화의 가능성이 큰 청정 에너지원이기 때문에 기초 연구 차원의 소규모 발전 시스템 개발을 국책 사업으로 추진할 필요성이 높다. 태양열 발전 기술과 국내외 보급 현황 및 향후 전망 등을 알아본다.

강 용 혁

한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부(yhkang@kier.re.kr)

## 기술의 특징

에너지는 국가의 산업이 발전함에 따라 필연적으로 그 소비가 증가하는 특징이 있다. 따라서 우리나라에서 경제 성장에 따른 에너지 소비의 증가는 필연적일 수밖에 없다. 하지만 문제는 화석 에너지의 사용에 따른 대기 오염 및 지구 온난화 문제로 인하여 에너지에 대한 새로운 인식이 요구되는 상황이다. 즉 21 세기에는 재생 가능하고, 경제적으로 효율적이며, 환경에 무해한 에너지원이 필요한 시점이다.

세계 역사의 발전 단계를 산업적 관점에서 보면 에너지원의 변천사라 볼 수 있으며, 21 세기에는, 화석 연료로 시작한 산업 혁명보다 큰 에너지원의 변환이 태양 에너지를 중심으로 자연 순환계에 순응하는 청정한 신재생 에너지 사용으로 도래하여 환경 친화형 지속 가능한 에너지 패러다임이 전개 될 것이다.

아직까지 전세계적으로 태양 에너지 연구는 주택의 난방 및 급탕 시스템, 온수기, 농·수산물 건조기, 저가 집열기 및 소규모 태양광 발전 등이 주류를 이루고 있으며, 태양열 발전에 관한 연구는 발전에 필요한 고온 획득 방법과 고온 재료 개발 등이 문제가 되어 큰 진전을 보지 못하고 있다. 그러나 지난 '80 대 중반 미국에서 10 MW급의 태양열 발전 시스템의 실용화가 이루어진 이후 각국에서 집중적인 개발 투자를 계속하고 있어 2000년대에는 가장 강력한 태양 에너지 이용 방법으로 광범위하게 보급될 전망이다.

태양 복사열은 지구상에서 가장 큰 재생 가능한 에

너지원으로, 전 세계 사막의 약 1%에 태양열 발전소가 세워진다면 2000년에 소비된 전 세계 에너지를 충분히 공급할 것이다. 태양열 발전 기술은 실제 실증과 검증이 되어진 기술로 100년이 넘게 경험이 축적되어 왔으며, 현재 미국 캘리포니아에 설치된 9 개의 PTC(parabolic trough concentrator)를 이용한 태양열 발전소에서는 90억 kWh 이상 송출하고 있어, 지금 당장이라도 시장 활성화를 위한 조치가 취해진다면 그 즉시 광범위한 응용 및 적용을 위한 준비가 되어 있다.

태양열 발전은 현재 발전 단가가 US \$ 12~20/kWh 이고, 장기 발전 단가는 US \$ 5~10/kWh인 가장 가격 경쟁력이 있는 대체 에너지 발전 기술 중 하나이다. 태양열 발전 단가는 '90년대 중반에 이미 상용 화력 발전 단가보다 약간 높은 수준까지 떨어졌으며 2000년대 초에는 10 \$/kWh 이하로 떨어질 전망이다. 대규모 중앙 집중식 타워형이 실용화될 2000년대에는 부하 평균화용으로서 충분한 경제성을 가질 것으로 보인다. 시스템 설치 비용도 현재의 2,000 \$/kWh 정도에서 2000년경에는 1,000 \$/kWh 정도까지 낮아질 것으로 전망되고 있다.

태양열 발전 시스템에 쓰이는 열기관으로는 대규모 시스템인 경우는 일반 화력 발전에 쓰이는 증기 터빈 기술이 채택되고 있으며, 소규모 시스템의 경우는 열효율이 높고 크기가 작은 Stirling 엔진이 많이 쓰인다. 태양열 발전 시스템의 요체라고 할 수 있는 집광 집열기는 선초점형이 상용화되어 있고, 대표적인 분산형 태양열 발전 시스템인 미국의 SEGS

에도 채택되고 있다. 접시형 집광 집열기는 규모가 상대적으로 작은 독립형 시스템과 소규모 분산형 시스템에 적합하며 아직은 본격적인 상용화 단계에는 이르지 못하고 있다.

태양열 발전에 있어 가장 앞서 있는 미국은 '90년대 초부터 태양열 발전 기술 개발 계획 'Solar Thermal Electric Program' 을 의욕적으로 추진하고 있으며, 여기에는 Sandia Lab., NREL 등 국립 연구기관과 Southern California Edison, 3M 등의 기업이 참여하여 대규모 시스템 개발과 집중식 시스템에 쓰이는 반사경을 비롯한 접시형 집광 집열기 등에 관한 연구를 수행하고 있다. 이러한 개발 투자가 열매를 맺을 21세기에는 태양열 발전이 새로운 에너지원으로 각광을 받게 될 것으로 보인다. 태양 추적 장치 가격이 40 \$/m<sup>2</sup> 선에 이르면 태양열 발전 시스템의 경제성도 크게 향상되어 점차 보급이 활발해질 것으로 전망된다.

우리 나라에서는 이러한 아직 이런 대규모 태양열 발전 시스템을 건설하는 것은 재원이라든가 소요부지 등의 제약 요소가 많아 실현을 기대하기가 어려우나 태양열 발전은 21세기를 대비할 수 있고 실용화의 가능성이 큰 청정 에너지원이기 때문에 기초연구 차원의 소규모 발전 시스템 개발은 대책 사업으로 추진할 필요성이 높다.

## 태양열 발전 기술의 종류 및 특징

### 발전 방식에 따른 분류

태양열 발전 시스템의 종류는 크게 세 가지로 중앙집중형 시스템(central receiver solar thermal electric power system), 분산형 시스템(distributed solar thermal electric power system), 독립형 시스템 등으로 구분된다.

중앙 집중형 시스템은 태양 추적 장치(heliostat)라고 불리는 거대한 태양 추적 반사경에서 반사된 태양광을 중앙에 위치한 탑의 한 점에 모아 고열을 얻고, 이 고열로 열교환기 등을 이용하여 고압 증기를 발생시켜 전기를 얻는 방식이다. 집광비는 1000 정도이며 증기 터빈은 약 600℃ 로 운전된다.

분산형 시스템은 선초점형이나 접시형 등 집광 집열기를 이용한 단위 집광 집열 시스템을 다수 분산

배치하여 배관 내를 흐르는 열매체를 가열시키고, 이를 이용하여 Stirling 엔진과 같은 열기관을 구동시켜 발전하는 방식이다.

독립형 시스템(stand-alone system)은 앞에서 언급한 집광 집열기를 이용하는 5~25 kWh 급의 시스템으로서 전력 계통으로부터 독립된 소규모 전원으로 이용되는 것을 말한다. 또한 태양열 발전 시스템은 그 규모에 따라 다음과 같이도 구분하기도 한다.

#### 1) 소규모 태양열 발전 시스템

수십~수백 W 범위의 것으로 열효율이 낮고 가격이 비싸며 열손실이 크다. 따라서 소규모 발전에는 태양광 발전 시스템보다 경제성이 없다.

#### 2) 중규모 태양열 발전 시스템

수십~수백 kW 범위의 것으로 분산형 시스템이 주로 사용되며 다소 경제성이 있다. 태양광 발전 시스템과 특수한 경우에는 경쟁이 될 수 있다.

#### 3) 대규모 태양열 발전 시스템

수백 kW~수십 MW급으로서 중앙 집중형 시스템이 대부분 여기에 들어간다. 최근까지 수백 kW로부터 수십 MW급의 태양열 발전 시스템이 각국에서 별 문제 없이 운영되고 있으며, 기술적인 문제들이 대부분 해결된 상태이나 아직 대규모 축열 시스템에 대한 연구는 미진한 상태이다. 대표적인 시스템으로는 SEGS(solar electric generating system, Luz사에서 건설)을 들 수 있다.

### 집광 기술(Concentrating Technologies)에 따른 종류

#### 1) Parabolic Troughs

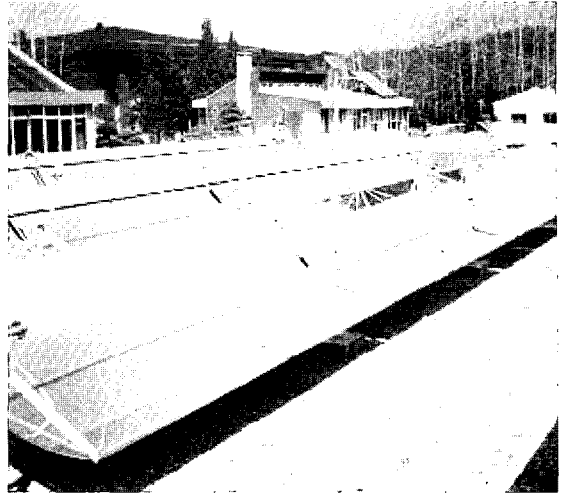
PTC의 반사면은 trough의 축점에 놓인 집열관에 태양열을 모은다. 집열관 내의 가열된 열매체는 파이프를 통해 터빈/발전기에서의 사용을 위해 열교환기로 수송되어 증기로, 때로는 직접 집열관에서 증기로 만들어지기도 한다. PTC는 1축은 고정되어 태양을 추적한다. 이 기술은 공정열이나 화학 반응을 위해 열을 제공하기 위해 제공되며, 현재는 전력 생산을 위해 많이 사용되고 있다. 집광비는 10~30 sun 정도이다.

2) Power Tower

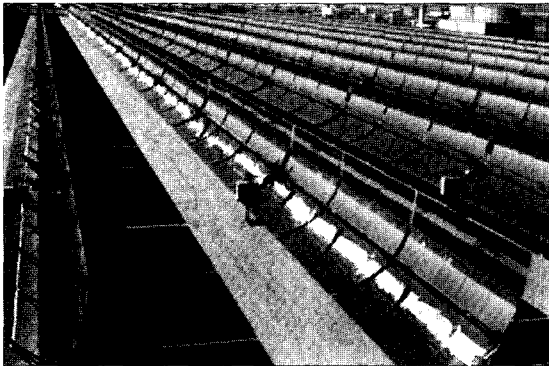
Power Tower 시스템에서는 heliostat가 중앙 타워에 설치된 집열기에 태양 일사를 반사하고 모으는 역할을 한다. 집열기의 열전달 매체로는 molten salt, 공기 또는 액체 금속 등이 사용된다. 가열된 열매체는 축열소를 거쳐 전력 변환 장치에서 전기를 생산한다. 이 시스템의 집광비는 300~1500 sun 정도이며 1500℃ 이상에서도 작동이 가능하다.

3) Dish Systems

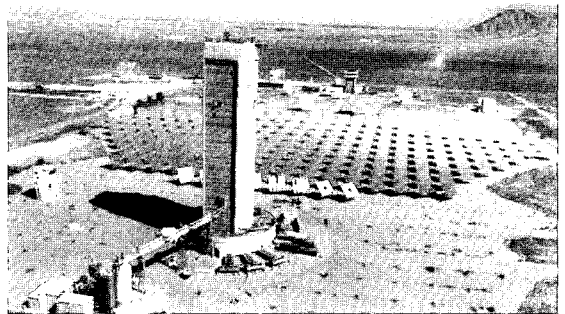
Dish 시스템은 dish의 초점에서 태양열을 모은다. 이 시스템은 수천 sun의 집광비를 얻을 수 있다. 이 집열기는 태양 에너지를 직접 열로 변환시켜 열로 직접 이용하거나 화학 공정에 사용할 수 있으며, 가장 보편적인 사용 형태는 전력 생산이다.



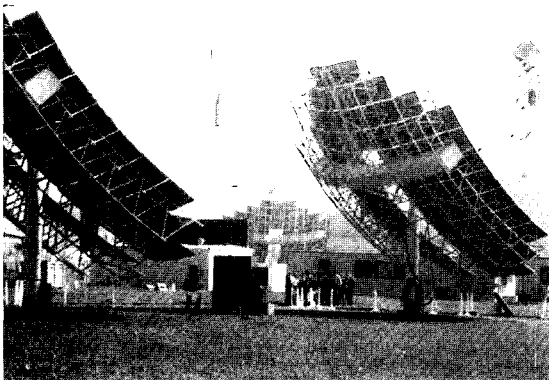
[그림 1] PTC 태양열 집광 시스템, KIER



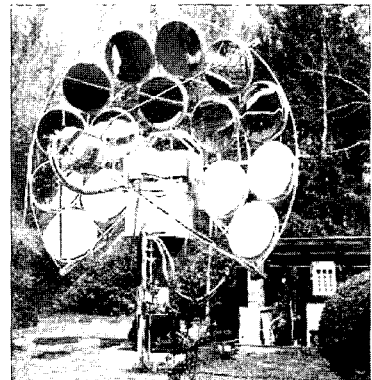
[그림 2] 미국 NREL - PTC 태양열 발전용 시스템



[그림 3] 미국 Sandia Lab. Power Tower



[그림 4] 미국 25 kW급 태양열 발전 시스템



[그림 5] 한국에너지기술연구원 Dish 집광 시스템 (10 kW)

4) 태양열 굴뚝(Solar Chimneys)

태양열 굴뚝의 구조는 지상의 집열기와 굴뚝으로 구성된다. 그 작동 원리는 지상의 집열기는 얇은 금속 막이나 유리와 같은 투명한 재료로 덮여 있어 그 안의 공기를 태양열에 의해 가열시킴으로서 온실 효과를 일으켜, 가열된 공기를 중심부에 설치된 굴뚝을 통하여 상승하도록 하여 연속적으로 자연 순환에 의해 굴뚝의 하단부에 위치한 발전기 역할을 수행하는 공기 터빈을 작동시켜 발전을 한다. 집열기 즉 온실에서의 가열 공기와 굴뚝 상단부의 대기 온도의 차이가 크면 클수록, 굴뚝 위에서는 더 큰 압력 강하가 일어난다. 이러한 현상이 가열 공기의 상승 작용을 일으키고, 역학 에너지를 만들어 낸다. 그러므로 굴뚝의 높이가 높을수록 효과는 더욱 커지게 된다. 생성되는 에너지와 전기의 양은 굴뚝을 통과하는 공기량, 즉 굴뚝의 직경과 터빈에 비례한다.

Dish/Stirling 태양열 발전 기술

시스템 개요

Dish/Stirling 태양열 발전 시스템은 오목한 포물형 태양열 집광기(dish), 동공 흡수기(cavity receiver)와 전기 발전기와 교류기를 갖는 Stirling 엔진으로 구성되어 있다.

이런 구성 요소들의 역할은 다음과 같다.

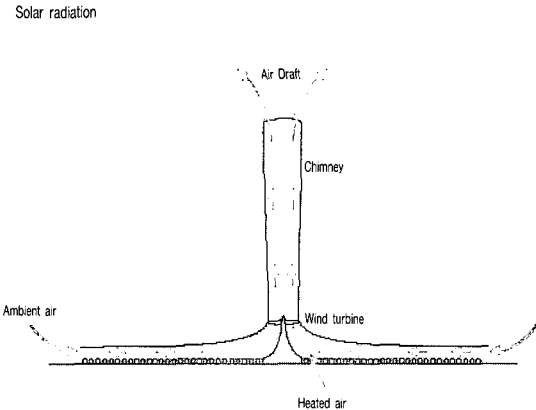
- 태양 추적 시스템은 직접 태양을 향하여 태양광학적 축을 유지하면서 태양 집광기가 2축으로

회전한다. 집광기의 형상은 집광기의 초점에 위치한 동공 흡수기에 태양 광선을 반사한다.

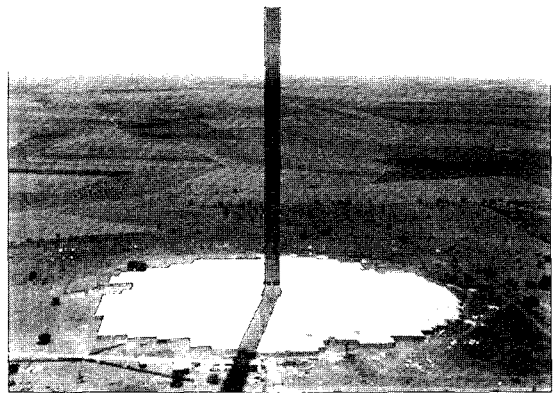
- 동공 흡수기는 집광된 태양 에너지를 흡수한다. 그때 열에너지가 Stirling 엔진에 있는 작동 가스를 가열한다.
- Stirling 엔진은 가열과 냉각을 교대로 작동 가스(주로 수소 혹은 헬륨)로 채워진 밀봉된 시스템으로 구성되어 있다. 엔진 내부에서 지속적으로 재순환되고, 소비되지 않기 때문에 작동 가스라고 부른다. 엔진은 냉각될 때 작동 가스는 압축되고 가열될 때 팽창하면서 작동된다. 냉각 가스가 압축할 때보다 가열 가스의 팽창에 의하여 더 많은 동력이 생산된다. 이러한 작동은 엔진의 피스톤에서 상승 그리고 하강 압력을 생산하여 이 운동이 기계적인 동력으로 변환한다. 몇몇 Stirling 엔진은 기계적인 동력을 전기로 변환하기 위해서는 분리된 전기 발전기 또는 교류기에 의존하지만 반면 나머지는 교류기가 엔진에 통합된다. 결국 보조 장치가 부착된 엔진/교류기는 종종 변환기 혹은 동력 변환 장치라고 부른다.

Dish/Stirling 응용에 사용된 태양열 집광기는 일반적으로 점집광 포물선 접시 집광기(point-focus parabolic dish concentrator)이다. 작은 면적에 입사하는 태양 광선이 반사하는 금속 박판 유리 혹은 플라스틱으로 된 반사 표면을 초점이라 부른다.

집광기가 2차원적으로 태양 에너지를 집광시키므로 이러한 집광기의 2축을 따라 태양 궤적을 추적한



[그림 6] 태양열 굴뚝을 이용한 동력 발전소의 작동 원리



[그림 7] Manzanares solar chimney (MSC)

다. Dish/Stirling 시스템에서 집광기 크기는 최대 일사량(일반적으로 1,000 W/m<sup>2</sup>)에서 원하는 동력, 집광기 그리고 동력 변환 효율에 의하여 결정된다. 현재까지의 기술을 토대로 5 kW Dish/Stirling 시스템은 약 직경 5.5 m 크기의 dish가 요구되고, 25 kW 시스템은 직경 10 m 크기의 dish가 요구된다. 집광기는 일반적으로 알루미늄의 반사 표면, 유리의 앞과 뒷면에 은을 코팅하거나, 플라스틱 필름을 사용한다.

얇은 유리 거울에 은을 코팅한 반사경은 과거에 사용되었다. 요즘은 알루미늄에 얇은 폴리머 필름을 사용하거나 혹은 필름의 앞뒷면에 은을 코팅하여 사용하고 있다.

태양 집광기 설계에서 최근의 혁신적인 경향은 Stretched membrane의 사용이다. 여기서 얇은 반사 membrane은 rim 혹은 hood을 가로 질러 펼쳐지고, 뒷면에 2차 membrane으로 마감하여 일정 공간을 형성한다. 이 공간에 약간의 진공을 걸면 반사 membrane은 거의 구에 가까운 형상(spherical shape)이 된다.

**연구 개발된 시스템**

먼저 폭넓은 시험을 마친 주요 시스템과 구성 요소들을 요약하였고, Dish/Stirling 시스템의 디자인과 성능 특성들을 표 1에 요약하였다.

이러한 시스템들은 상업적 시판을 목적으로 개발

<표 1> Dish/Stirling 시스템에 대한 디자인과 성능 사양

SYSTEM							
Name	Vanguard	MDAC	German/Saudi	SBP 7.5-m	CPG7.5-kW	Aisin/Miyako	STM Solar PCS
Year	1984	1984-88	1984-88	1991-	1992-	1992-	1993-
Net Electricity*	25kW	25kW	52.5kW	9kW	7.5kW @950W/m <sup>2</sup>	8.5kW @900W/m <sup>2</sup>	25kW(design)
Efficiency*	29.4% <sup>2760°C gas temp.</sup>	29%-30%	23.1%	20.3%	19% 950W/m <sup>2</sup>	16% 900W/m <sup>2</sup>	-†††
Number	1	6	2	5	3 Built, 14 planned	3 planned	1
Location(no.)	CA	CA(4),CA,NV	Riyadh,Saudi Arabia(2)	Spain(3), Germany(2)	CA, TX, PA	Miyako Is, Japan	SNL-TBC
Status	Testing completed	Testing completed	Occasional ops.	Testing now	Initial testing of 5-kW prototype	Fabrication	-
CONCENTRATOR							
Manufacturer	Advanco	MDAC	SBP	SBP	CPG	CPG	-
Diameter**	10.57 m	10.57 m	17 m	7.5 m	7.3 m	7.5 m	-
Type	Faceted glass mirrors	Faceted glass mirrors	Stretched membrane	Stretched membrane	Stretched membrane	Stretched membrane	-
No. of Facets	336	82	1	1	24***	24	-
Size of Facets	0.451 × 0.603 m	0.91 × 1.22 m	17 m dia.	7.5 m dia.	1.524 m dia.	1.524 m dia	-
Surface	Glass/silver	Glass/silver	Glass/silver on stainless steel	Glass/silver on stainless steel	Aluminized plastic film	Aluminized plastic film	-
Reflectance(initial)	93.5 %	91 %	92 %	94 %	85 % to 78 %	85 % to 78 %	-
Concentration†	2750	2800	600	4000	1670	1540	-
Tracking	Exocentric gimbal	Az-el	Az-el	Polar	Polar	Polar	-
Efficiency	89 %	88.1 %	78.7 %	82 %	78 %	78 %	-

\* At 1000 W/m<sup>2</sup> unless otherwise noted    \*\* Equivalent disk    \*\*\* 32 for temporary high output

† Geometric concentration ratio    † † † Depends on concentrator used

되었고, 경제성은 Dish/Stirling 시스템의 상업화를 위한 중요한 문제가 되고 있다.

### 1) Vanguard 25-kWe 시스템

제트추진 연구소(JPL)에서 출발한 Advanco 사는 1984년에 25 kWe Vanguard Dish/Stirling 시스템을 개발했다. 이 시스템은 캘리포니아의 Rancho Mirage에 설치되어 태양열-전기 변환 효율이 29.4%를 기록했다.

### 2) McDonnell Douglas 25-kWe 시스템

United Stirling 4-95 Mark II 엔진은 수소를 작동 유체로 사용하며 설정 온도는 720 (133 F)이다. 최대 압력 20 MPa(2900 psi)에서 이 엔진은 일사량 1000 W/m<sup>2</sup>하에서 25 kW의 순수 동력을 전달한다. McDonnell Douglas 사의 모든 Dish/Stirling 시스템은 최고 20~25%의 태양열-전기 변환 효율을 갖는다.

### 3) German/Saudi 50-kWe 시스템

50kW United Stirling 4-275 엔진을 가진 세 개의 17 m(56 ft) dish는 Schlaich에 의해 만들어 졌고, DLR의 도움을 받아 시험되어졌다(Noyes, 1990). 첫 번째 시스템은 1984년 독일의 Lampoldshausen에 설치되었고 이것은 유럽에서 처음으로 운전한 대용량 Dish/Stirling 시스템이다. 또 다른 두 개의 시스템은 과학 및 기술 목적으로 리야드 근처의 사우디아라비아의 국립 센타 내의 Solar Village에 설치되었다. 이 리야드 시스템은 53 kW의 순수 전기 출력을 낼 수 있고 1000W/m<sup>2</sup>의 일사량에서 태양열-전기 변환 효율은 23%이다.

## 현재 개발 중인 시스템

### 1) Schlaich, Bergemann und Partner 9-kWe 시스템

독일의 Stuttgart에 있는 Schlaich, Bergemann und Partner(SBP)는 7.5 m(25 ft)의 단일면(single-facet)을 가진 확장된 막(stretched-membrane) 형태의 dish와 Stirling 엔진을 병합시킨 Dish/Stirling 시스템을 개발하였다. 현재 5 개의 이러한 시스템이 시험 가동 중에 있다.

Schlaich 집광기는 직경이 7.5 m이고 두께가 0.23

mm인 확장된 막(stretched membrane) 형태의 stainless steel로 이루어져 있다.

V-160 엔진은 하나의 압축 팽창 실린더 사이에서 생기는 160 cm<sup>3</sup>(10 in<sup>3</sup>)의 최고 부피를 가지고 630 (1170 F)에서 작동 기체로서 헬륨을 사용한다. 이 엔진의 효율은 30%이고, 총 태양열-전기 변환 효율은 20.3%이다. 이러한 7.5 m 시스템은 현재 6 개가 건설이 되었다. 그 중 3 개가 현재 스페인의 Almeria에 있는 Plataforma Solar에서 가동 중이며, 매일 작동되는 상태 하에서 시스템의 장기 성능을 시험하고 있다. 또 다른 Schlaich Dish/Stirling 시스템은 독일의 Pforzheim에서 가동 중이고 나머지 두 개가 독일의 Stuttgart에 건설되어져 있다.

### 2) Cummins Power Generation 7.5-kWe System

Cummins Engine Company의 자회사인 Indiana 주 Columbus의 Cummins Power Generation 주식회사(CPG)는 태양열 발전을 목적으로 free-positon Stirling 엔진을 사용한 태양열 Dish/Stirling 시스템을 세계 최초로 제작하고 작동시킨 곳이다. 전기 생산 시스템의 경우 예상되는 순수 출력은 7.5 kWe 가 될 것이다. CPG 사는 이 3 개의 원형 시스템 이외에도 여러 다른 지역에서의 시험을 위해 14 개의 7.5 kWe급 시스템을 생산할 계획이다. 이 시스템의 태양열-전기 변환 효율 목표치는 약 19% 정도이다.

CPG-460 집광기는 space frame 상에 설치된 24 개의 stretched-membrane facets으로 구성된다. 각각의 facet은 지름이 1.52 m(5 ft)이고 두께가 0.8 mm인 aluminized polymer membrane이 원형 테두리 양면에 확장되어져 있다. 이러한 두 membrane 사이는 약간의 진공 상태가 유지되는데, 이러한 진공으로 인해서 형상이 거의 구형에 가까운 형태를 유지하게 해준다. 이 집광기는 극추적(polar tracking) 시스템을 가지고 있다.

Sunpower 주식회사는 시스템을 위한 선형 교류 발전기가 장착된 9 kWe급 free-positon Stirling 엔진을 개발 중이다. 작동 기체는 629 (1250F)의 헬륨이다. 시스템의 예상 수명 목표는 고장 간격이 평균 4,000 시간인 40,000 시간이다. 엔진/교류 발전기 효율 목표치는 33%로 이미 설정이 되었다.

### 3) Aisin Seiki Miyako Island System

일본 Kariya 시의 Aisin Seiki 주식회사는 일본 정부의 New and Industrial Development Organization (NEIDO) Project하에서 NS30A 30 kW급 엔진을 제작했다. 이것은 고정된 각도의 회전 경사판 구동 장치를 사용하는 4 개의 피스톤 2중 작동 엔진이며 헬륨 기체를 사용해서 683℃ (1260 F)의 온도와 14.5 MPa(1740 psi)의 압력에서 작동한다.

Aisin 사는 Okinawa 남서쪽 290 km 지점에 있는 Miyako Island에 전력을 공급하기 위해 3 개의 Dish/Stirling 엔진을 제작 중에 있다. 집광기는 CPG-460 stretched-membrane dish 형태이다. 이러한 적용을 위해 Aisin 사의 NS30A 30 kW급 four-cylinder 고정 회전 경사판 운동형 엔진이 사용되므로 8 kW로 하향 조정되어 사용될 것이다. 이러한 엔진은 태양광을 직접 흡수하는 튜브형 흡수기를 가지고 있다.

### 4) Stirling Thermal Motors 25-kWe Solar Power Conversion System

Stirling Thermal Motors 주식회사와 Detroit Diesel Corporation은 STM4-120 Stirling 엔진을 병합한 태양열 변환 시스템을 디자인하고 시험해 왔다. STM4-120은 1800 rpm에서 총 출력이 25 kWe이고 히터-튜브 온도가 800 를 나타낸다. 이러한 엔진은 다양한 태양열 집광기와 결합 할 수 있다. 이 시스템은 Sandia National Laboratory의 Test Bed Concentrator 위에 장착되었다.

Stirling Thermal Motors의 태양열 변환 시스템은 가변적 출력 변위 제어 장치가 장착된 STM4-120 엔진을 가지고 있다. 이 변환 시스템은 직접 반사광을 흡수하는 tube-bank 흡수기, 교류 발전기, 그리고 엔진 냉각 시스템을 포함하고 있다. 크기는 86 cm×86 cm×198 cm(34 in×34 in×78 in)이며 무게는 725 kg(1600 lb)이다. 이 엔진은 SAE #5 Flywheel Housings를 위해서 NEMA 284/286 단독형 베어링 발전기를 장착 할 수 있다.

### 태양 추적 시스템

Point Focus형 태양열 집열기는, 집열기의 설치 위치에 따라 동서 또는 남북으로의 고정된 축을 중심으로 회전 (1축 태양 추적 방식) 하는 PTC 시스템과

는 달리, 2축 태양 추적 장치를 사용한다. Point Focus형 집열기에서 일반적으로 사용되고 있는 2축 태양 추적 장치는 회전축의 방향에 따라서 Polar, Azimuth-Elevation 및 Exocentric Gimbal 추적 방식으로 나누어지며, 이들 각각은 다음과 같이 회전축을 중심으로 회전한다.

#### 1) Azimuth-Elevation Tracking System

집열기는 지구 표면과 평행한 평면에 수직인 축을 중심으로 회전(Azimuth 축)하고, 동시에 이에 수직인 축을 기준으로 하여 회전(Elevation 축)한다.

#### 2) Polar Tracking Method

집열기는 지구의 자전축과 평행한 축에 대하여 시간 당 1° 회전하고, 동시에 이와 수직인 축(Declination Axis)을 기준으로 하여 년 ±23.5 (최대 0.016°/시간) 이내에서 회전한다.

#### 3) Exocentric Gimbal Tracking Method

집열기를 Gyro에서 사용되고 있는 것과 같은 2축 Gimbal Mechanism에 장착하고, 이를 각각 구동시킴으로서 태양을 추적한다

Parabolic dish형 태양열 집열기의 태양 추적 방식을, 문헌상에 공개된 시스템 중 대표적인 것을 중심으로 분류하면 표 2와 같다.

태양의 위치를 판별하고 이를 Dish Tracking System에 전달함으로써 Parabolic Dish형의 집열기가 항상 태양을 향하도록 하는 태양 위치 판별 Sensor는 최근까지 여러 가지 형태의 연구 결과가 발표되었다. 이들 중 대표적인 것들이 Solar Cell 및 그림자를 이용하는 방식을 취하고 있으며, 일부에서는 포토다이오드와 프리즘을 이용하는 방식을 취하기도 하였다.

<표 2> Parabolic dish형 태양열 집열기의 태양 추적 방식

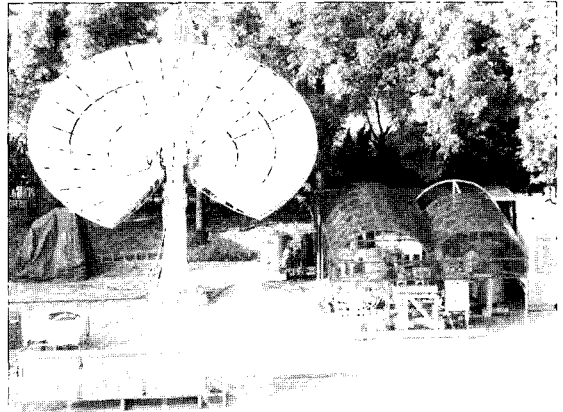
시스템 명	설치위치	발전용량(KW)	Dish Size(m)	추적방식
Vanguard	미국	25	11	Exocentric Gimbal
MDAC	미국	25	11	Azimuth-Elevation
German /Saudi	Saudi Arabia	52.5	17	"
SBP 7.5m	Spain	9	7.5	Polar
CPG 7.5 KW	미국	7.5	7.3	"
Aisin/Miyako	일본	8.5	7.5	"

## 국내외 기술 개발 및 보급 현황

### 국내 개발 현황

#### 1) Dish형 집광 시스템 적용 산업용 태양열 시스템 실용화 개발

개발된 10 kW급 Dish형 집광기는 직경이 7.8 m, 초점 거리 4.68 m로 파라볼릭 곡면을 갖는 고반사 코팅 반사경 50 개로 구성되었으며, 집광비 600 이상, 집열 효율 90%, 최대 작동 온도 650°C 이상을 실현하였다. 또한 반사경은 저철분 투명 유리로 두께가 3.2 mm이며, 고반사율을 위한 Ag/glass 박막 전면 코팅 및 보호 코팅 방법을 도입하였다.

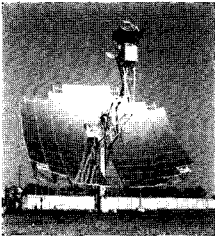

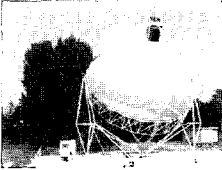
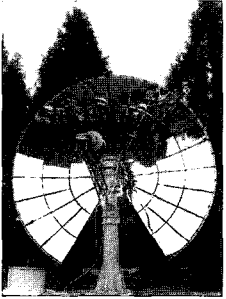


[그림 8] KIER의 접시형 태양열 집광 시스템이용 ORC 발전 실증

#### 2) 주요 선진국과의 기술 비교

주요 선진국과의 기술 비교를 표 3에 나타내었다.

<표 3> 주요 선진국과의 기술 비교

연구기관	Sun Lab. (SNL+NREL Partership)(미국)		DLR(독일), PSA(스페인)	KIER(한국)
참여기업	Boeing, SES	SAIC, STM	SBP, MERO	(주)동아산전 (주)G&C Tech. (주)한국에너지21
시스템 사진				
집광기 형태	Fixed focus facets	Stretched membrane	Fixed focus facets	Fixed focus facets
집광기 지름	10.5 m	12 m	8.5 m	7.8 m
집열면적	87.7 m <sup>2</sup>	113.0 m <sup>2</sup>	56.7 m <sup>2</sup>	40.0 m <sup>2</sup>
반사경수	82	16	12	50
반사율	91% 이상	90% 이상	94%	85% 이상
작동온도	720°C	720°C	650°C	650°C
예상발전량 (Peak Power)	25 kW	22 kW	10 kW	10 kW



국외 기술 개발 및 보급 동향

1) 국외의 기술 개발 및 보급동향을 표 4~6과 같다.

<표 4> 미국의 기술 개발 및 보급 동향

개발현황	보급동향	주요시책(R&D)
<ul style="list-style-type: none"> <li>태양열발전 및 산업이용기술</li> <li>- Solar Tower Power</li> <li>- Dish Engine 실용화, 상용화</li> <li>- Hybrid PTC Plant 실용화</li> <li>- 산업공정열 실용화</li> <li>- 유독성 폐기물 실용화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시장확대 (현보급량: 365 MW)</li> <li>- 10 MW급 운전중</li> <li>- Dish 7.7 kW, 25 kW급 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SRCC 검증 및 등급</li> <li>국제표준규격화</li> <li>시스템 복합화</li> <li>태양열 발전 설계 보조자금 지원</li> </ul>

2) 미국 접시형(Dish) 태양열 발전 시스템 가격 변화

그림 9에서 보는 바와 같이 미국에서는 태양열 발전 기술을 저가화하여 2020년에는 발전 단가를 5¢/kWh로 하여 20백만 MW 보급 추진하고 있다.

태양열 복합 발전

태양열 복합 발전의 필요성

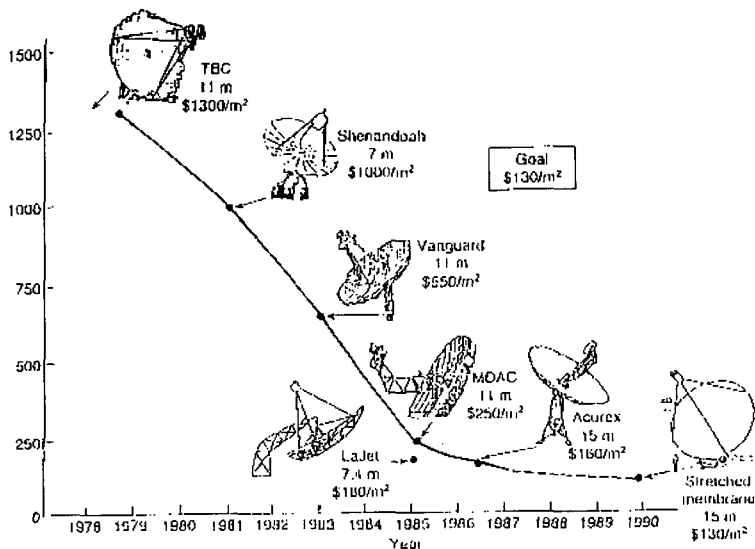
태양 에너지는 일조 시간 및 기후 조건에 따른 자원 활용의 시간적 한계를 가지고 있다. 이러한 이유로 태양 에너지를 전기나 화학 물질 등 유용한 형태로 전환하고자 하는 공정은 최적의 운전 조건에서 장치

<표 5> EC의 기술개발 및 보급 동향

개발현황	보급동향	주요시책(R&D)
<ul style="list-style-type: none"> <li>태양열발전</li> <li>- Dish형 개발 (7.5kW)</li> <li>- 태양화학공정(폐수, 유독성 폐기물처리)</li> <li>- 부품개발</li> <li>- 실증실험(Dish형, Tower형)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7 MW, 4 MW Power Tower 운영</li> <li>60 kW 태양로</li> <li>Dish(44 m<sup>2</sup>) 개발완료</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEA Task Solar PACES Program (14개국 참가)</li> </ul>

<표 6> 호주의 기술 개발 및 보급 동향

개발현황	보급동향	주요시책(R&D)
<ul style="list-style-type: none"> <li>산업 시스템 개발</li> <li>-태양열 집열기 및 온수기개발</li> <li>- PTC형 개발</li> <li>태양열 발전</li> <li>- Dish형 시스템 개발 (50 kW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Big Dish (4000 m<sup>2</sup>) 실용화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEA Task Solar PACES Program (14개국 참가)</li> </ul>



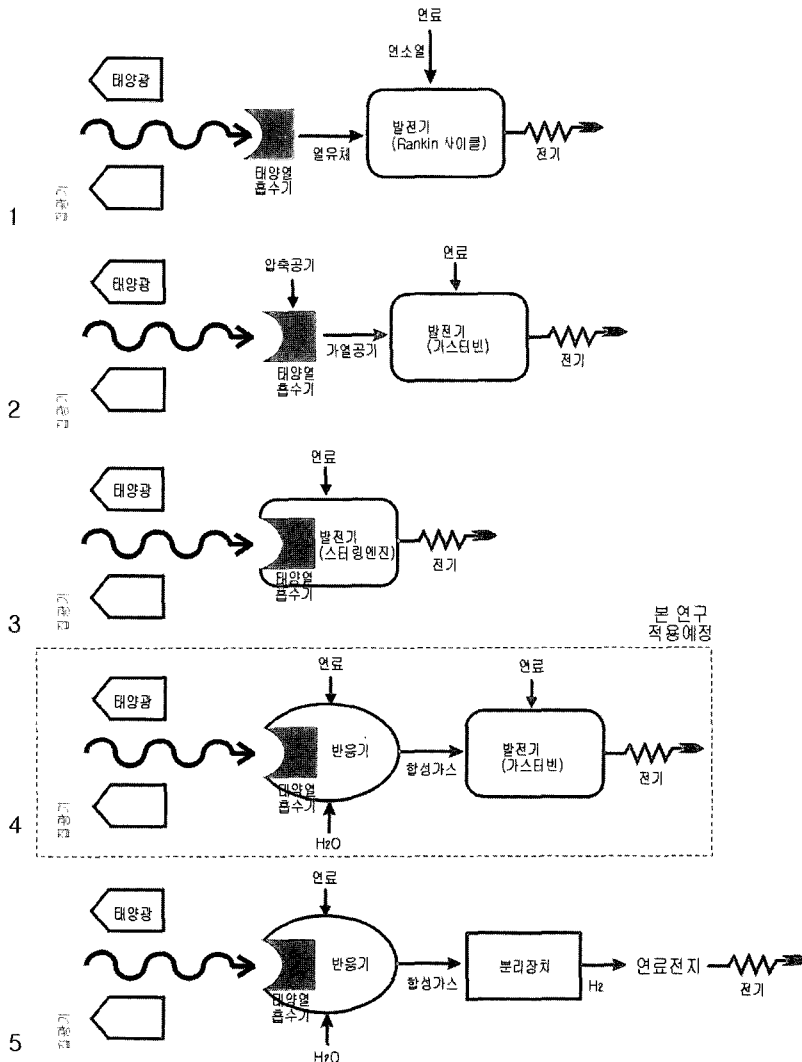
[그림 9] 미국 접시(Dish)형 태양열 발전 시스템 가격 변화 (NREL Report)

의 용량을 최대한 활용하여 연속적인 조업을 하지 못하게 되는 결과를 유발해 전체적인 태양 에너지 이용 효율을 저하를 가져온다는 약점을 지니고 있다.

이러한 약점을 보완할 수 있는 방법은 크게 두 가지로, 첫째는 태양 에너지를 일정한 저장 매체를 통하여 저장하고 야간이나 기후 조건이 좋지 않은 시기에 적절하게 활용하는 방법으로, 이는 사막 등에 설치된 대규모 태양열 발전 설비에서 일반적으로 사용되고 있는 방법이다. 두 번째는 태양 에너지와 천

연 가스 등의 화석 연료를 동시에 이용하는 복합 시스템을 구축하는 것으로 이러한 방식은 일조 조건에 따라 화석 연료의 사용량을 조절하여 (발전의 경우) 발전 설비를 최적의 조건에서 최대 용량으로 운전하여 일정한 양의 전기를 지속적으로 생산할 수 있으며, 공급되는 태양 에너지를 모두 발전에 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

따라서 별도의 화석 연료 공급이 불가능한 (사막 등) 특수한 지역에서의 태양열 발전 설비가 아니라



[그림 10] 태양열 복합 발전 시나리오

면 두 번째 방법인 '복합 발전'은 중단기적으로 태양열을 이용하여 고효율, 양질을 발전을 행할 수 있는 가장 효과적인 대안이 될 수 있다.

**태양열 복합 발전의 방식**

복합 발전은 태양광 집광 방식, 이에 따른 집열 온도, 발전 방식, 사용되는 화석 연료의 종류, 복합 열원 연계 방식, 발전 용량 등 다양한 조건에 따라 서로 다른 시나리오를 가지게 되는데, 현재 적용 가능한 기술 수준을 고려할 때에 그림 10과 같은 5종의 방식으로 크게 분류할 수 있다.

시나리오 1~3의 경우 집광기를 통하여 얻어진 고온의 태양열을 발전 설비에 열의 형태로 전달하는 경우인데, 1은 태양열을 열유체를 이용하여 회수한 후 ORC 등의 발전 사이클을 별도의 연료와 함께 구동하여 복합 발전을 행하는 경우로 복합 장치의 구성은 용이하나 비교적 낮은 발전 효율을 가진다. 2의 경우는 발전 설비로 가스 터빈을 이용하고 터빈으로 공급되는 압축 공기를 태양열을 이용하여 가열하여 공급되도록 하는 장치 구성으로, 이때 태양열은 터빈 발전기의 효율을 향상시키고 연료를 절감시키는 데에 기여하게 된다. 3의 경우는 외연 기관인 Stirling 엔진을 이용하여 발전을 행하고 열원 공급이 이루어지는 고온부를 태양열과 연료의 연소열을 함께 이용할 수 있도록 설계한 방식으로, 간단한 구조를 가지면서도 비교적 작은 규모의 고효율 복합 발전을 행할 수 있으나 복합 열원의 효과적 사용을 위한 복합기의 개발이 필요하다.

시나리오 4, 5의 경우 고온 태양열을 반응에 이용하고 이를 통하여 얻어진 반응물을 발전 설비에 연료의 형태로 공급하는 경우로서, NG 등의 연료를 고온 태양열로 열분해하여 수소 함량이 높은 연료로 개질하고 이를 터빈에 연료로 사용하거나 수소만을 분리하여 연료 전지에 사용토록 하는 방식이다.

**향후 전망**

IEA는 신재생 에너지를 이용한 전기 생산이 1991년에 40 TWh/yr에서 2010년에 191 TWh/yr로 증가될 것을 기대하고 있으며, RIGES (Renewable Intensive Global Energy Scenario) 논문들은 신재생

전력 기술들이 2025년에 4,651 TWh/yr, 세계 전기 공급의 22%의 공헌을 기대하고 있다.

국내 태양열 에너지 중장기 보급 목표는 2012년까지 현재 보급량(41,000 toe/년)의 10 배 이상을 목표(385,000 toe/년)로 하고 있으며, 태양열 에너지의 산업화 기반 구축으로 보급 확산시킬 예정이다.

2002년 대체에너지개발 및 이용보급촉진법 개정(2002.2)에 따라 신축 공공 건물 대체 에너지 설치 의무화, 대체 에너지 발전 차액 보전, 대체 에너지 제품 인증제 등이 실시되어 태양열 에너지 중 잠재 수요가 크고 파급 효과가 큰 보급형 Solar House (SH), 중고온 태양열 시스템 및 태양열 발전 시스템을 중점 개발하여 태양열 산업화가 될 수 있도록 하고 있어 태양열 첨단 분야인 중고온 태양열 발전 분야의 향후 전망은 무척 밝은 편이다.

**참고문헌**

1. <http://www.advancedbuildings.org/>
2. <http://solstice.crest.org/>
3. <http://www.doe.eren.gov/>
4. <http://www.iea-shc.org/>
5. <http://www.caddet-re.org/>
6. <http://www.solarpaces.org/>
7. <http://www.psa.es/>
8. <http://www.ises.org/>
9. <http://www.seia.org/>
10. <http://www.nrel.gov/>
11. <http://www.sandia.gov/>
12. <http://www.ise.fhg.de/>
13. 과기부, 국가기술지도, 2003
14. 산자부, 중장기 대체에너지 기술개발 및 보급 기본계획, 2003
15. 국가과학기술위원회, "국가기술지도 2단계 : 핵심기술별 기술지도", 2002.12
16. 산업자원부, 에너지관리공단, "2002년도 대체에너지기술개발자료집", 2002.12
17. 에너지관리공단, "우리나라의 대체에너지 정책 및 지원제도", 2002
18. 에너지관리공단, "2002년도 대체에너지 보급 관련 자료집", 2003.6