



# 태양열을 이용한 발전기술



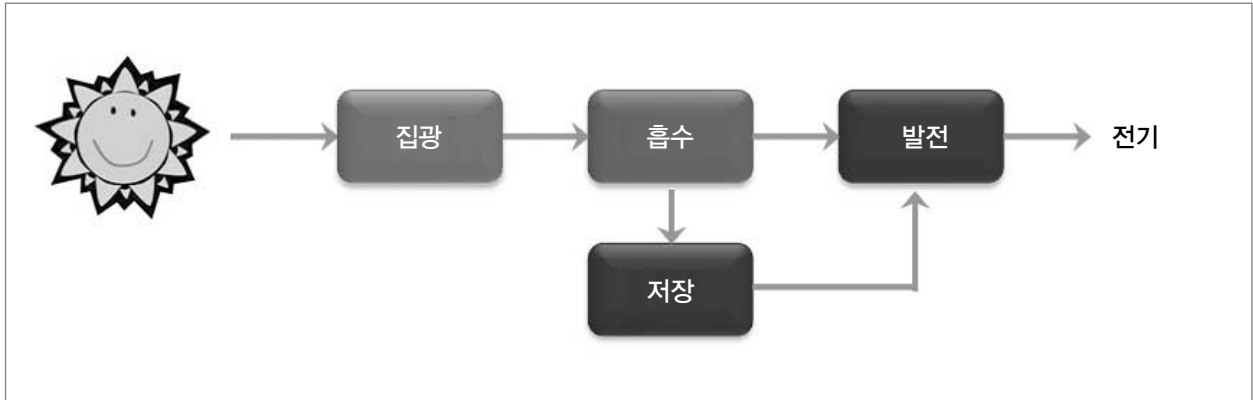
이 현 진

한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 선임연구원

## 1. 개요

태양열 발전(CSP, concentrated solar power)은 고온으로 집광된 태양 복사에너지를 열원으로 이용하여

기존의 화력발전과 마찬가지로 터빈이나 엔진을 구동하여 전기를 생산하는 방식이다. 일반적으로 태양열 발전은 집광, 흡수, 저장, 발전부로 구성된다. 태양 빛은 에너지 밀도가 낮기 때문에 고온을 얻기 위해서는 다수의



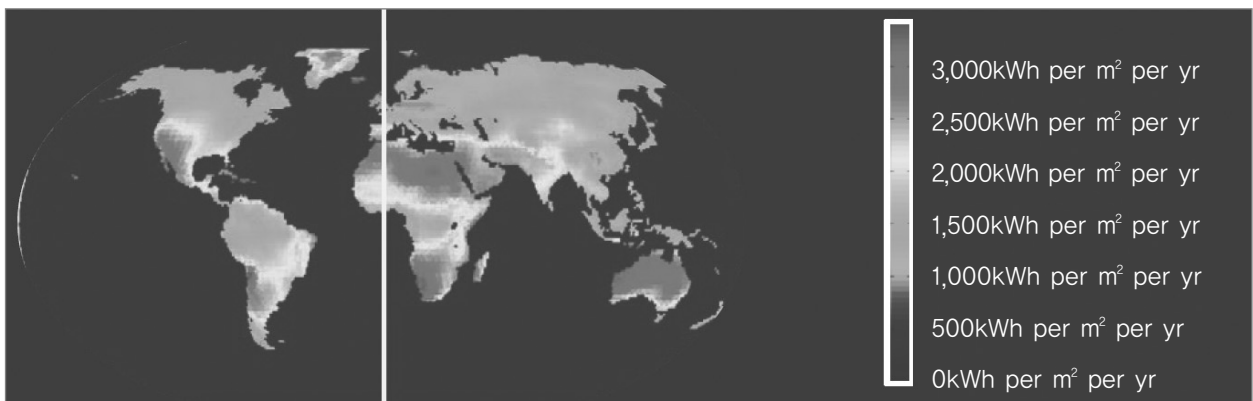
[그림 1] 태양열 발전의 구성

반사판을 이용하여 태양을 추적하며 집광한다. 흡수부는 집광된 태양열을 열전달 매체에 전달하는 열교환기의 역할을 한다. 고온의 열전달 매체의 일부는 일몰 후 전기 생산을 위해 저장되고 나머지는 발전부로 가서 전기를 생산한다.

태양열 발전은 일반적으로 소규모 분산형 보다는 대규모 중앙 집중형 발전에 적합하다. 열저장을 통해 전력 공급자가 원할 때 발전하는 능력(Dispatchability)은 태양열 발전의 가장 큰 장점이다. 또한, 전기와 열 모두 공급이 가능하므로 화석 연료 뿐만 아니라 바이오, 지열 등 다양한 열원과 함께 하이브리드 발전이 가능하다.

산업에 필요한 공정열 공급이나 고온 열화학공정을 통한 수소 생산 분야에도 활용 가능하다.

태양열 발전은 추적식 집광이 필요하므로 태양 복사 에너지 중에 확산(Diffuse) 성분은 사용하지 못하고 단지 직달(Direct) 성분만을 이용한다. 직달일사량(DNI, Direct Normal Insolation)은 중동, 아프리카, 미국 서부, 호주, 중앙아시아, 남미 일부 등 전반적으로 사막 지역에서 풍부하다. 한국의 직달일사량은 연평균 약 1,000 kWh/m<sup>2</sup>/year 정도로 태양열 발전에 유리한 조건은 아니다.



[그림 2] 태양열 발전을 위한 직달일사량 자원

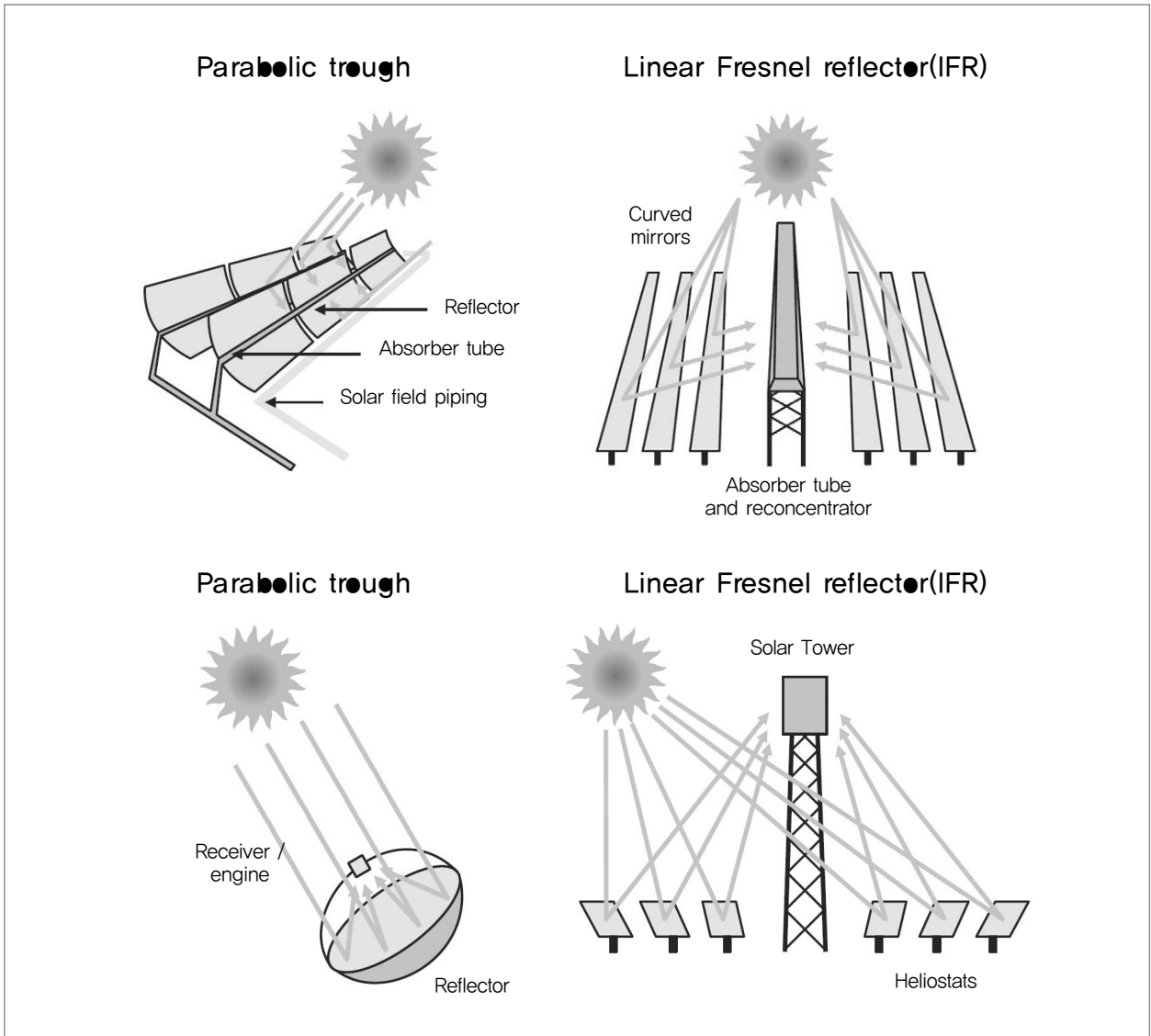
(출처: CSP Technology Roadmap, IEA, 2010)

## 2. 종류 및 특징

발전규모나 방식으로도 가능하지만, 일반적으로 태양열 발전은 집광 방식에 따라 구분한다. 집광 방식에 따라 가능한 작동 유체와 도달 가능한 온도, 터빈 종류, 열저장 가능 여부 및 방식 등이 결정되기 때문이다. 집광 방식은 크게 네 가지로 구분한다. 먼저 구유형(PTC, Parabolic Trough Concentrator)과 선형프레셀형(LFR, Linear

Fresnel Reflector)은 한 개의 축으로만 태양을 추적하여 2차원으로 집광(선 초점)한다. 반면 중앙흡수기형(CRS, Central Receiver System)과 접시형(Parabolic Dish)은 태양을 두 축으로 추적하여 3차원 집광(점 초점)이 가능하다.

구유형은 가장 발전된 형태로 상용화된 태양열 발전소의 대부분을 차지한다. 말구유 형태의 포물 반사판을



[그림 3] 집광 방식에 따른 태양열 발전 기술 분류

(출처: CSP Technology Roadmap, IEA, 2010)

한축으로만 회전하여 집광하고, 초점의 위치에 튜브형 흡수기를 둔다. 이후 합성 오일을 흡수기 튜브에 통과시켜 가열하고, 이를 열교환하여 생산된 과열증기로 터빈을 구동한다. 일반적인 집광비는 50정도이고, 작동 유체의 온도는 400℃ 이하이다. 구유형 태양열 발전소는 열원만 태양열로 바뀐 랭킨사이클(Rankine Cycle)로서 발전 효율은 15% 정도이다.

선형프레넬형은 반사판이 구유형의 프레넬 형태로 평면이나 작은 곡률의 긴 반사판 배열로 구유형의 포물면을 근사한 집광 방식이다. 구유형에 비해 설비가 간단하고 부지사용이 적어 초기 투자비가 절감되는 장점이 있다. 또한, 구유형과 달리 흡수기가 반사판과 같이 회전하지 않으므로 흡수기에서 직접 증기 생산(Direct Steam Generation)이 가능하다. 하지만, 집광 효율은 떨어지고, 집광비도 40정도로 작아 고온 발전에 적합하지 않다.

포물 접시를 두 축으로 집광하는 접시형은 주로 초점 위치에 독립적인 발전부를 갖는다. 발전부는 흡수기와 더불어 일체로 제작하며, 집광 추적 시 시스템 전체가

움직인다. 스텔링 엔진(Stirling Engine)이나 마이크로 터빈과 같은 소형 엔진이 발전을 위해 사용되고, 공기를 이용하여 냉각한다. 집광비가 1,000~4,000 정도로 매우 높아 발전 효율은 태양열 발전 중에 가장 높다. 하지만, 상대적으로 동일 발전용량 대비 초기 투자비가 높고, 반사판 크기 제약으로 인해 현재는 발전 용량이 30kW 이하이다. 분산형 발전에 적합하고 열저장이 어려우므로 집광형 태양광(Concentrating Photovoltaics) 기술과 경쟁관계에 있다.

타워형으로 불리기도 하는 중앙흡수기형은 접시형의 프레넬 형태로 헬리오스탯(Heliostat)이라 불리는 다수의 평면 또는 곡률 반사판을 필드에 배치하여 집광한다. 타워 꼭대기에 흡수기를 설치하고, 이를 집광 목표로 헬리오스탯을 운전한다. 아직은 서너 개의 중앙흡수기형 발전소가 상용화에 진입한 초기 단계지만, 개발 중인 발전소에서는 중앙흡수기형의 비중이 증가하고 있다. 집광비가 200~1,500 정도로 상대적으로 높으면서, 기술 개발을 통한 성능 향상의 여지가 높고 적용 분야가 다양하여 발전 가능성이 높은 기술이다. 중앙흡수기형은

[표 1] 태양열 발전의 집광 방식에 따른 특성 비  
(출처: CSP Technology Roadmap, IEA, 2010)

Technology	Optical efficiency	Annual Solar-to-electric efficiency	Land occupancy	Water Cooling (L/MWh)	Storage possible	Possible backup/hybrid mode	Solar fuels	Outlook for improvements
Parabolic troughs	**	15%	Large	3000 or dry	Yes, but not yet with DSG	Yes	No	Limited
Linear Fresnel receivers	*	8~10%	Medium	3000 or dry	Yes, but not yet with DSG	Yes	No	Significant
Tower(Central receiver system)	**	25~30% (concepts)	Medium	2000 or dry	Depends on plant configuration	Yes	Yes	Very significant
Parabolic dishes	***	25~30%	small	none	Depends on plant configuration	Yes, but in limited cases	Yes	Through mass production

다른 집광 방식에 비해 헬리오스탯을 필드에 배치하는 것이 중요하다. 집광 효율에 영향을 줄 뿐만 아니라 필드의 크기는 초기 투자비와 관련이 있으므로, 효율과 비용을 감안하여 최적화된 헬리오스탯 필드를 설계해야 한다. 또한, 다양한 목적에 따라 멀티 타워나 멀티 흡수기가 가능하므로 고도화된 집광 기술이 필요하다.

위에서 언급된 네 가지 집광 방식에 따른 태양열 발전소의 특성을 표 1에 정리 하였다.

### 3. 국내 · 외 현황

2011년 기준으로 약 1.2GW 용량의 태양열 발전소가 전 세계에 설치되었고, 스페인(582MW)과 미국(507MW)이 대부분을 차지한다. 현재 약 17GW 용량 발전소들이 건설 또는 계획 중에 있다.(미국 약 8GW, 스페인 4.46GW, 중국 2.5GW)

최근에는 이들 나라 외에도 중동, 북아프리카, 인도, 남아프리카 공화국 등 높은 일사 지역의 후발 주자들도 태양열 발전에 적극적인 관심과 참여를 나타내고 있다.

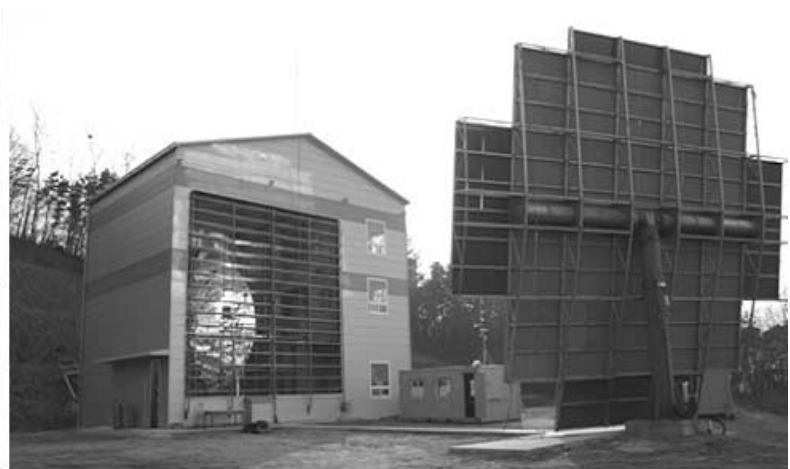
미국, 스페인, 중국에서 태양열 발전이 활발한 것은 정부의 적극적인 지원이 있었기 때문이다. 미국은 2009년 정부보조금을 통해 설치비의 30%까지 세금감면을 해주는 정책을 2010년 말까지 시행하였다. 또한, 주 차원에서 장기적인 재생에너지 사용 목표를 선정하고 재생에너지 할당제(RPS, Renewable Portfolio Standard)를 시행하고 있다. 이를 위해 주요 발전 사업자에게 재생에너지원으로 생산된 전력을 구매하게 하는 전력수급계약(PPA, Power Purchase Agreement)을 강요하고 있다.

한편, 스페인 정부는 비록 50MW 이하의 발전소에만 적용이 되었지만, 0.27€/kWh에 해당하는 매우 호의적인 발전차액제도를 2007년 법제화하였다.

특히, 2008년 경제 위기와 재정 적자에도 불구하고, 2009년 스페인 정부는 2013년까지 2,340MW 태양열 발전에 대해서는 발전차액제도를 보장하였다. 중국 정부는 2020년 까지 15%의 비화석 연료(Non-Fossil Fuel) 사용을 계획하였다. 이를 계기로 주정부가 소유한 발전 사업자들은 미국 회사와 기술 제휴를 통한 대형 태양열 발전소 개발을 추진하고 있다. 예를 들어 Penglai Electric은 미국 eSolar와 함께 2GW 규모까지 태양열 발전소를 중국 내륙에 건설할 계획이다.



10kW 접시형 시스템



40kW 태양로

[그림 4] 한국에너지기술연구원의 태양열 발전 시설



[그림 5] 국내 최초 대구 200kW 중앙흡수기형 태양열 발전소

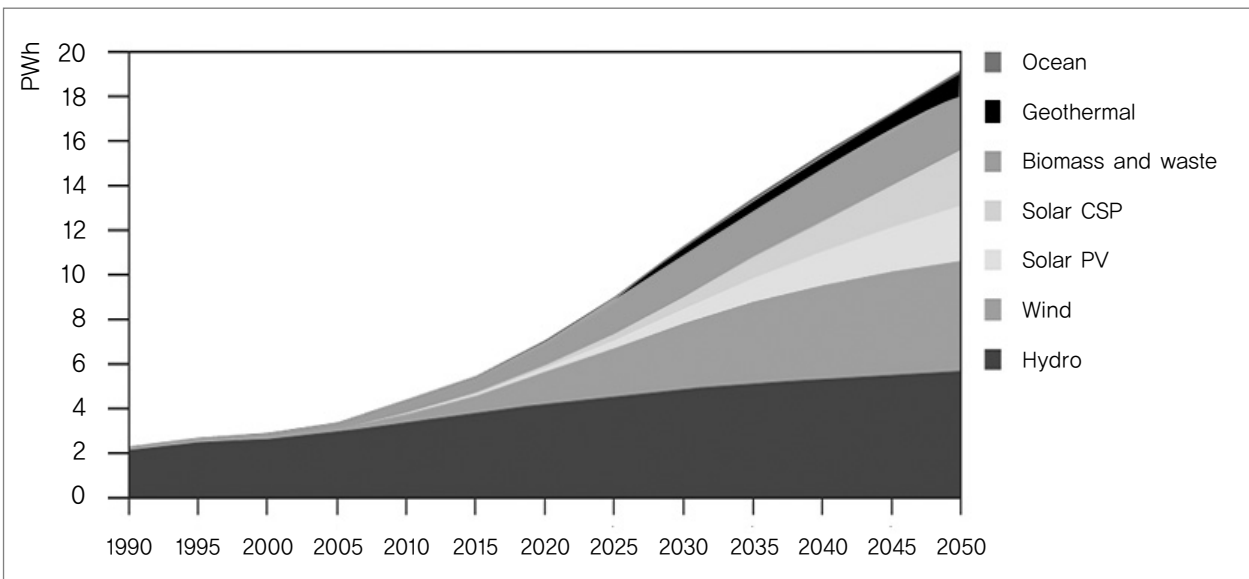
국내에서 태양열 발전은 낮은 일사 조건으로 인해 아직 상용화되지 못하고 연구 개발만 진행 중이다. 한국 에너지기술연구원은 1994년부터 구유형을 이용한 고정밀 연구를 시작하였다. 1996년부터는 접시형 기술에 주력하여, 독일의 스텔링 엔진을 이용하여 10kW급 상용화 모델을 개발하였다. 근래에는 중앙흡수기형에 초점을 맞추어 고정밀 고정밀 헬리오스탯 및 태양로(Solar Furnace)를 활용한 공기식 흡수기 연구를 활발히 진행하고 있다. 한편, 2011년에 대성에너지(주)는 국내 최초로 200kW 태양열 발전소를 대구에 건설하였다. 이 프로

젝트에 참여한 디아씨(주)는 헬리오스탯 정밀 제작 기술을 확보하였고, 나노씨엠에스는 고반사 소재를 개발하여 스페인 반사판 제작업체에 수출 계약을 맺었다. 이밖에 선다코리아는 100kW 구유형 태양열 발전소 개발을 2010년부터 진행하고 있다.

#### 4. 전망

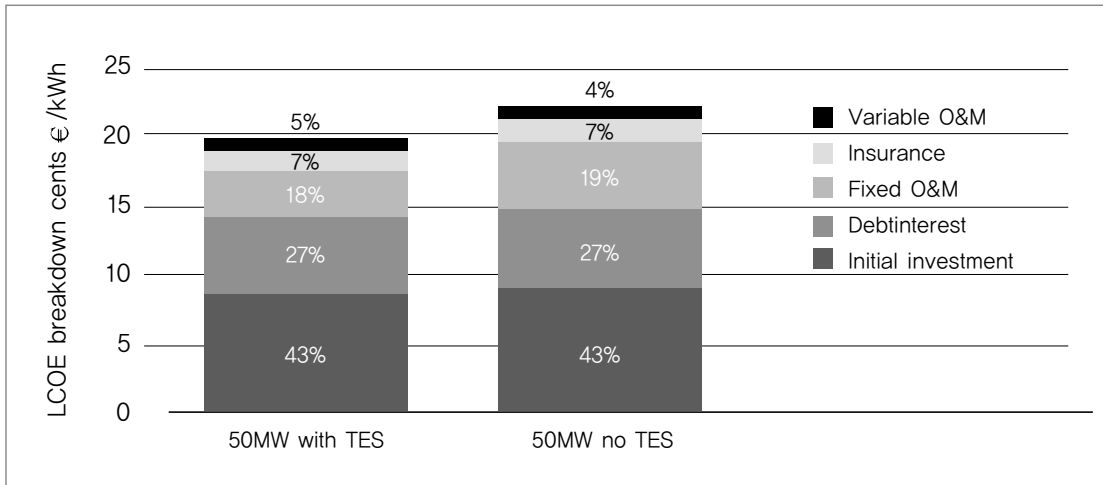
태양열 발전이 현재 설치 용량에서는 타 에너지에 비해 적으나, 앞으로는 빠른 성장이 예상된다. 열저장을 이용한 높은 가동시간을 바탕으로 2050년에는 태양광이나 바이오매스와 비슷한 수준으로 전력 생산이 이루어 질 전망이다.

다른 재생에너지 기술과 마찬가지로 태양열 발전도 발전 단가를 낮추어 가격 경쟁력을 갖추는 것이 가장 시급한 문제이다. 그림 7은 7.5시간 열저장을 가진 50MW 구유형 태양열 발전소의 발전 단가 분석이다.



[그림 6] 재생에너지의 전 세계 발전 용량 전망

(출처: Energy Technology Perspective, IEA, 2010)

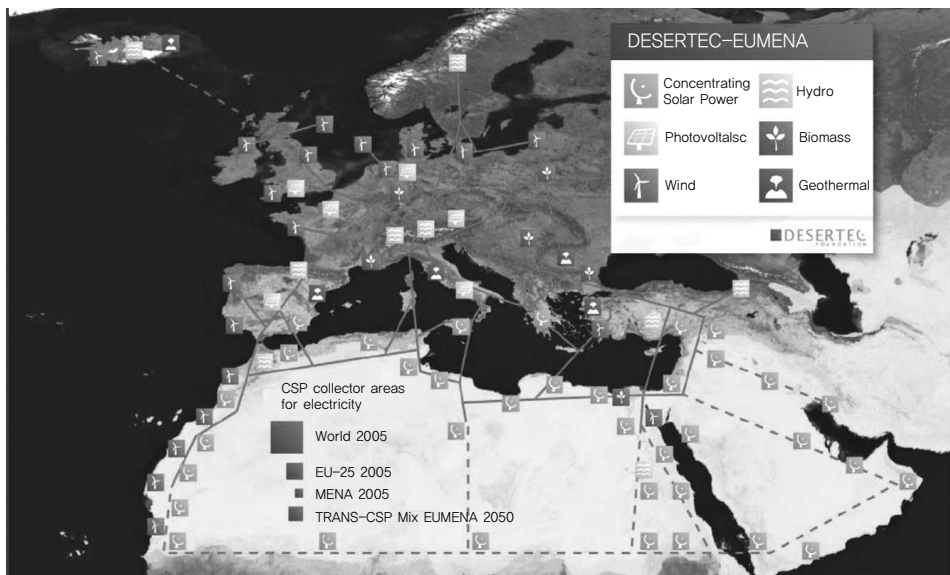


[그림 7] 50MW 구유형 태양열 발전소의 발전 단가 분석

(출처: CSP Parabolic Trough Report, CSP Today, 2011)

전체 발전 단가의 43%를 차지하는 초기 투자비 절감이 가장 중요하다. 전체 투자비 중 반사판을 포함한 집광 설비가 약 1/3을 차지하므로 혁신적인 기술 개발이나 100MW 이상 대응량화가 필요하다. 초기 투자비가 많아 자금 동원을 위한 기간이 길고 은행 대출 이자가 높으므로 정책적인 지원을 통해서도 발전 단가 감소가 가능하다.

효율과 가동률 향상도 발전 단가를 줄이는 중요한 방법이다. 고반사율, 고내구성 반사판 기술과 고효율 열저장 기술은 모든 종류의 태양열 발전에 혜택을 줄 것이다. 무엇보다도 기존 화력발전의 고효율 발전(과열 또는 초임계 증기 발전, 고온 고압 공기를 이용한 복합 발전)에서 사용이 가능하도록 작동 유체를 생산하는 흡수 기술의 개발이 절실하다. 고효율 발전 기술은 중앙흡수



[그림 8] 유럽-중동-북아프리카 지역의 DESERTEC 프로젝트

(출처: DESERTEC Foundation)

기형에서 구현될 가능성이 높으므로 헬리오스탯 필드 설계 최적화, 추적 시스템 개선, 헬리오스탯 정밀 제어 등의 기술 개발이 요구된다. 구유형 흡수기에서 직접 증기 생산이나 중앙흡수기형 흡수기에서의 용융염을 열전달 매체로 사용하는 기술과 같이 중간 열교환 과정을 생략하는 기술도 의미가 있다.

태양열 발전은 열저장을 통해 태양 에너지의 최대 단점인 불안정한 전력 공급 문제를 극복할 뿐만 아니라 일몰 후 전력 생산이 가능하다. 이런 장점은 미래에 재생 에너지의 보급이 확대될수록 중요해질 것이다.

유럽에서는 유럽-중동-북아프리카 지역을 하나의 전력망으로 연결하고 다양한 재생에너지로 전력을 공급 하려는 DESERTEC 프로젝트가 진행 중이다. 그림 8에서 보여주듯이 태양열 발전은 미래 재생에너지 중심의 전력 네트워크에서 중요한 역할을 하고 있다. 유사하게 아시아에서도 몽골의 고비사막에서부터 일본을 연결하는 GOBITEC 프로젝트에 대한 담론이 시작되고 있다.

이와 같은 미래를 구현하기 위해서 태양열 발전은 발전 단가 절감의 노력을 지속적으로 진행하면서 안정적인 전력 공급 능력을 바탕으로 고일사량 지역에서부터 보급을 확대해야 할 것이다.

국내에서는 낮은 일사량으로 인해 태양열 발전은 지금까지 주목 받지 못했으나, 근래에는 기존 발전소를 운영 하던 발전사업자나 중동·아프리카에서 활동 중인 기업을 중심으로 관심이 증대되고 있다. 태양열 발전은 화력, 원자력, 담수화 플랜트 기술, 토목 및 건설 기술, 철강 및 콘크리트 같은 전통 소재 기술 등 국내 산업의 강점과 융합 가능한 신재생에너지기술이다. 독일이 우리나라와 유사한 낮은 일사량에도 불구하고 세계 최고의 태양열 발전 기술을 보유하고 기술과 부품의 수출 강국이 된 사실을 염두에 두면서, 이제는 국내 태양열 발전 사업화 전략을 수립할 때이다. 아직 전 세계 태양열 발전 시장에 참여할 기회는 여전히 많다. KEA

#### [참고문헌]

- CSP Technology Roadmap, IEA, 2010.
- Concentrating Solar Power 2011, GTM Research.
- Solar Thermal Electricity 2025 by ESTELA, 2010.
- CSP Parabolic Trough Report, CSP Today, 2011.
- Energy Technology Perspective, IEA, 2010.
- www.wikipedia.org.