

# 초고온 열저장 시스템 기술 동향

태양열 발전시스템(Concentrated Solar Power system, CSP) 등에서 적용되고 있는 초고온 열저장 시스템에 대한 기술 소개를 하고자 한다.

## 서론

최근 에너지의 효율적 이용에 대한 관심이 증가하고 있는 가운데 에너지의 잉여, 혹은 부족을 해소하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 가운데 열을 필요로 하는 여러 분야에 있어서 열에너지의 효과적인 저장과 활용은 시스템의 안정적인 운용이라는 측면에서 중요하게 다루어지고 있다. 또한, 에너지 자원의 고갈 및 전력피크 해결에 대한 요구의 증가에 따라 하나의 대안으로 축열시스템의 요구가 증가하고 있다. 열에너지의 저장, 즉 축열시스템에 대한 연구는 열에너지 네트워크와 같은 건물/산업의 냉난방, 공정열 제공뿐만 아니라 전자장비, 의류, 식물 분야 등 다양한 범위에 걸쳐 널리 연구되어 왔는데 비교적 저온 영역에 대한 축열기술이 응용되고 있다. 이와 더불어 플랜트의 고효율화, 태양에너지의 이용 등에 연구가 집중됨에 따라 고온 영역에 대한 축열기술의 개발, 활용이 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 고온 축열은 태양열 발전과 밀접한 관계가 있는데 미국의 경우, DOE(Department of Energy)를 중심으로 태양열 발전연구를 수행하였으며, 2014년을 CSP(Concentrated Solar Power)의 해로 지정하는 등 태양열 발전에 큰 추진력을 걸고 있다.<sup>1)</sup>

- 송찬호**  
 한국기계연구원  
 책임연구원  
 sch@kimm.re.kr
- 윤석호**  
 한국기계연구원  
 책임연구원  
 shyoon@kimm.re.kr
- 김영**  
 한국기계연구원  
 선임연구원  
 ykim@kimm.re.kr
- 김동호**  
 한국기계연구원  
 선임연구원  
 dhkim@kimm.re.kr



[그림 1] 태양열 발전시스템<sup>1, 3)</sup>

태양열 발전의 핵심은 낮 시간의 태양열을 저녁 시간에 이용하는 것으로 그 기간 동안의 효과적인 축열이 발전 효율을 결정하는 중요한 인자가 된다. 축열기술을 고온의 영역으로 분류하기 위한 특별한 기준은 없으나 축열시스템의 저온부 온도가 약 200℃ 이상의 온도를 유지하는 저장 매체로 분류하여 고찰하는 경우가 있다.<sup>2)</sup>

본 원고에서는 고온 축열시스템을 주로 활용하는 태양열 발전시스템(Concentrated Solar Power, CSP)에서의 고온 열저장 시스템에 대해서 알아보고자 한다. CSP에 대한 종류 및 구성, 이와 관련된 열저장 시스템과 열저장 매체로서 축열 물질의 종류 및 조건, 그리고 축열 물질을 저장하는 저장탱크의 개발 방향에 대하여 기술하고자 한다(그림 1).

## 태양열 발전과 열저장 시스템

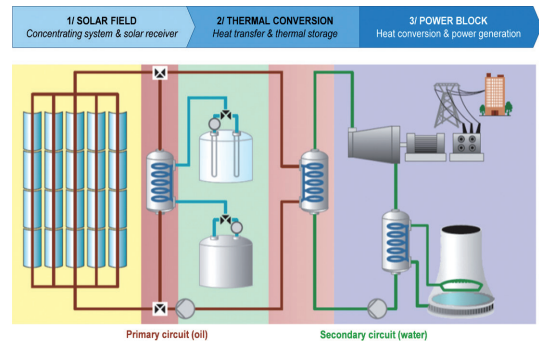
태양열 발전시스템은 그림 2와 같이 태양열을 집열하는 집열부, 가열된 열매체를 이송하고 저장하는 열저장부, 스팀을 생산하여 전기를 발생시키는 발전부 등으로 이루어진다. 태양의 열에너지를 집열 장치를 활용하여 1차 계통의 열매체(합성오일, 용융염 등)를 400~1,000℃ 정도로 가열한 뒤 열매체와 물과 간접 열교환하여 증기를 발생시키

고 이로부터 터빈을 구동시켜 전기를 생산하여 이용하는 발전시스템이다. 2차 계통을 가열하고 남은 열은 용융염을 활용한 축열조에 저장시킨 후, 흐린 날이나 야간에 사용하여 발전한다.<sup>5)</sup>

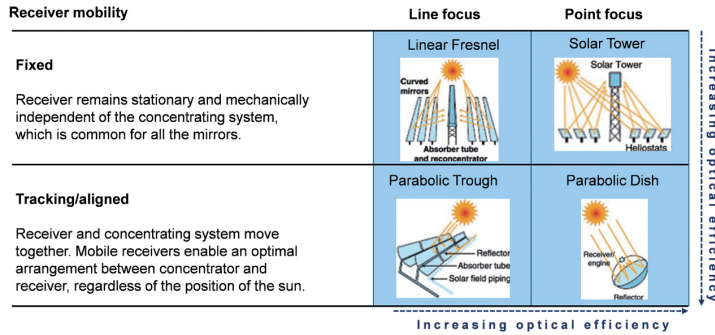
이 가운데 실제 전력을 생산하는 발전 장치 부분(Power Block)은 기존의 발전소와 동일하므로 날씨 변화나 밤에도 균일한 발전 용량을 확보하기 위한 축열부가 태양열 발전의 핵심이라고 할 수 있다.

태양열 발전은 그림 3과 같이 집광 방식에 따라 크게 구유형과 프레넬형으로 대표되는 라인집중방식, 중앙집중방식인 타워형 및 개별분산방식인 점시형의 네 가지로 분류할 수 있다. 대용량 발전에는 라인집중방식과 중앙집중방식이 적합하다.<sup>4)</sup>

이 가운데서 구유형 방식의 집열관 내의 열매



[그림 2] 태양열 발전시스템 구성 개략도<sup>4)</sup>



[그림 3] 집광방식에 따른 태양열 발전시스템의 구분<sup>4)</sup>

체는 증기발생기에서 열교환을 통하여 증기를 생산하거나 때로는 직접 집열관에서 증기를 생산하여 터빈을 구동, 전기를 생산하는 방식인데 비교적 저온인 400℃ 정도의 증기를 얻을 수 있다는 단점이 지적되고 있다. 이에 반해 타워형 방식과 접시형 방식은 비교적 800℃ 이상의 고온의 열을 수집할 수 있는 특징이 있다.

이러한 발전시스템에서의 열매체로는 물, 공기, 합성오일(Synthetic Oil), 용융염(Molten Salt) 등과 같은 유체 물질 또는 세라믹, 콘크리트 등과 같은 고체물질이 사용되고 있다. 그러나 저장효율 측면과 경제성 등을 고려하여 합성오일 또는 용융염 등

을 주요한 열매체로 채택하고 있다. 용융염과 합성오일에 대한 간략한 비교를 표 1에 나타내었다. 축열 물질에 대해서는 다음 절에서 자세히 다루고자 한다.

### 고온 축열 물질

열에너지를 저장하는 방법은 물질의 상태 및 반응에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 현열축열(Sensible Heat Storage)과 상변화를 이용하는 잠열축열(Latent Heat Storage), 그리고 흡열 및 발열의 반응 사이클을 이용하는 화학축열(Chemical Energy Storage) 방식이 그것이다.

현열축열은 축열 물질의 열용량을 이용해서 열저장을 하는 방법으로 사용되는 물질은 운전 온도 조건에서 상변화가 없어야 하고 화학적인 안정성을 유지해야 한다. 일반적으로 현열축열에 사용되는 물은 비교적 높은 비열 값을 가지고 있으므로 100℃ 이하의 저온 영역에서는 매우 좋은 축열 물질이다. 그러나 태양열 발전시스템과 터빈의 폐열에서와 같이 고온 영역에 있어서는 물 이외의 다른 물질을 고려해야 하는데 매체가 어떠한 상을 유지하고 있는냐에 따라 두 가지 즉, 고상 축열과 액상 축열로 나뉘질 수 있다. 고상 축열 물질은 일반적으로 자갈, 콘크리트, 벽돌 또는 금속이나 금속염이 고려

<표 1> 용융염과 합성오일의 특성 비교<sup>5)</sup>

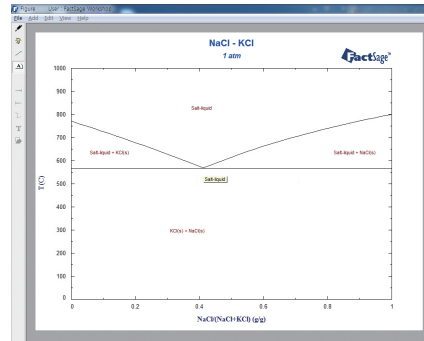
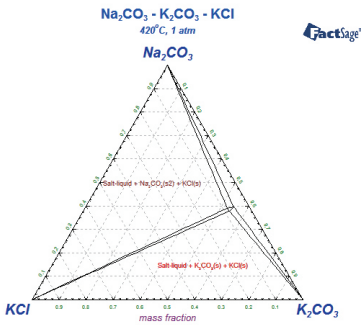
구분	용융염	합성오일
구성	표 2 참조	Diphenyl oxide + Biphenyl oxide
운전 온도	220~570℃	393℃ 이하
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대기압에서 액체</li> <li>· 효율 우수</li> <li>· 고온/고압 증기 생산 가능</li> <li>· 비교적 저가</li> <li>· 비연소성, 비독성</li> <li>· 적용경험, 기술력 풍부</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 낮은 어는 점</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 높은 어는 점(130 ~ 230℃)으로 인한 하한 운전온도가 제한</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 발전 주주기 온도 제한 : App. 370℃ → 스팀터빈 효율 저하</li> <li>· 간접식 열저장 방식에서 많은 오일 필요</li> </ul>

〈표 2〉 현열축열에 사용되는 축열 물질의 특성 및 가격<sup>a)</sup>

물질	온도(cold, hot) ℃		평균 밀도 kg/m <sup>3</sup>	평균 열전도도 W/mK	평균 비열 kJ/kgK	체적당 열용량 kWh/m <sup>3</sup>	질량당 비용 \$/kg	열량당 비용 \$/kWh
고상 축열								
모래/돌	200	300	1,700	1.0	1.30	60	0.15	4.2
콘크리트	200	400	2,200	1.5	0.85	100	0.05	1.0
NaCl	200	500	2,160	7.0	0.85	150	0.15	1.5
철(Iron)	200	400	7,200	37.0	0.56	160	1.00	32.0
철(Steel)	200	700	7,800	40.0	0.60	450	5.00	60.0
Silica 벽돌	200	700	1,820	1.5	1.00	150	1.00	7.0
Magnesia 벽돌	200	1,200	3,000	5.0	1.15	600	2.00	6.0
액상 축열								
미네랄오일	200	300	770	0.12	2.6	55	0.30	4.2
합성오일	250	350	900	0.11	2.3	57	3.00	43.0
실리콘오일	300	400	900	0.10	2.1	52	5.00	80.0
Nitrite 염	250	450	1,825	0.57	1.5	152	1.00	12.0
Nitrate 염	265	565	1,870	0.52	1.6	250	0.70	5.2
Carbonate 염	450	850	2,100	2.0	1.8	430	2.40	11.0
액상 sodium	270	530	850	71.0	1.3	80	2.00	21.0

될 수 있는데 전자의 경우에는 비용 측면에서 저렴하나 에너지 저장밀도와 열전도도가 낮음으로 인해 열저장 및 회수 속도가 느리다는 단점이 있다. 이에 비해 금속을 매체로 사용하는 경우 높은 저장밀도와 열전도도의 장점을 지나 가격이 높고 부식 우려의 단점이 있다. 액상 축열의 경우 높은 온도에서 액체를 유지하는 오일류나 용융염을 사용하게 되는데 오일의 경우 400℃ 이하의 온도에서 사용 가능하고 그 보다 높은 온도에서는 용융염을 사용하게 된다. 용융염은 높은 온도로의 확장성과 보다 큰 열저장 밀도의 이점을 가지고 있으나 저온부에서의 응고문제, 재료와의 부식문제 등을 고려해야 한다. 액상 축열은 고상 축열에 비해 열저장, 회수 및 수송에 있어서 매우 큰 장점을 가지고 있는 것은 분명하나 효율을 향상하기 위하여 온도 성층화와 같은 부분에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다(표 2).

잠열 축열은 물질의 상변화 잠열을 이용하여 열을 저장하는 방법으로 에너지 저장밀도가 크므로 현열축열에 비해 장치 부피나 무게를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 기상-액상의 상변화는 부피 변화가 크므로 일반적으로 고상-액상의 상변화를 이용하는 물질을 대상으로 한다. 시스템에서 필요로 하는 온도 범위의 잠열 축열 재료를 사용하게 되면 해당 온도에서 일정한 온도로 축열 및 방열을 할 수 있어 열이용 측면과 기기의 열효율 측면에서 유리한 장점이 있다. 그러나 재료에 따른 운전온도의 범위가 한정적이고 상변화에 따른 부피 변화 대응, 반복에 따른 상분리 현상, 과냉각 현상 등으로 효율이 저하되는 문제 등이 지적되고 있다. 이러한 잠열재의 적용 온도 범위는 대체로 100℃ 이하의 온도이며 약 400℃ 이하의 고온 영역에서 사용은 금속염 등을 이용해야 하는데 이에 대한 잠열 축열 기술은 아직



[그림 4] 축열 물질 개발을 위한 상평형 계산 프로그램(FactSage) 이용 예

미진한 상황이다.

화학 축열은 열에너지를 화학 에너지 형태로 저장하였다가 필요시 그 역반응을 일으켜서 화학 에너지를 다시 열에너지로 변환하여 활용하는 방법이다. 열저장 밀도가 잠열 축열보다 크고 열손실 없이 장기간 저장할 수 있는 장점으로 향후 고온 축열 분야에서 유용하게 응용할 수 있는 기술이나 불균일 반응계가 많고 지속적 가열 반응에 대한 신뢰도가 낮은 상황이며 현재까지 실험실 수준의 연구에 머물고 있는 기술이다.

이상의 축열 방법 중 현열축열을 고려한 초고온 열저장 시스템에서의 열매체로서 축열 물질을 사용하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

- 열용량이 크고, 고온에서 안정한 물질상태를 유지해야 하고 저장용기나 파이프에 대한 부식성이 낮을 것
- 열전달 매체로 사용하기 위해 점도가 낮을 것
- 혼합하여 공용화합물을 형성 시 녹는점이 낮아질 수 있는 이점 발생
- 무기염은 종류에 따라 500~1,000°C의 고온에서 안정한 용융 상태이며 열용량이 공기의 5배 정도로 큼
- 축열 물질 비용이 전체 열저장 시스템에서 차지하는 비율이 약 35% 정도로 축열 물질 비용에

따라 열저장 시스템의 경제성이 크게 영향을 받으므로 저렴한 물질의 개발, 적용이 필요함

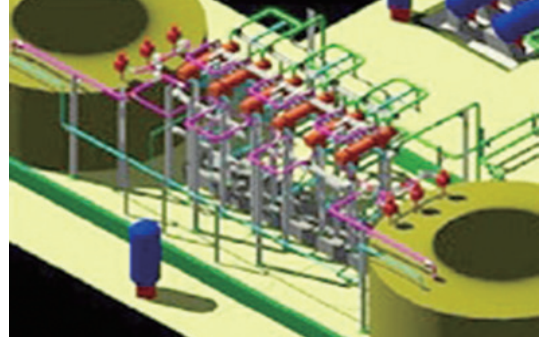
현재 CSP 시스템에서 상용화된 용융염의 경우 Solar Salt와 HITEC이 주로 사용되고 있다. CSP 시스템에서는 시스템의 종류에 따라 1,000°C까지 가열이 가능하지만, 집열된 열을 발전시스템 등으로 전달하는 시스템을 구축하는데 비용이 많이 들고, 스팀 발전시스템에서는 500°C 이상의 온도가 크게 필요하지 않으므로 대체로 550°C 이하에서 사용가능한 Solar Salt가 주로 사용되고 있다(그림 4).

### 축열 저장 탱크

현재의 고온 열저장에서는 현실적으로 현열 열 저장을 고려할 수밖에 없는 상황인데 저장방식에 따라 two-tank, thermocline, packed bed 등으로 구분할 수 있다.

two-tank 저장 방식에서 한 개의 탱크에서는 고온의 액체가 저장되어 있고, 다른 하나의 탱크에서는 그 보다 낮은 온도의 액체로 구성된다. 낮은 온도의 액체 상태는 이미 발전을 위하여 열에너지를 파워 블록(power block)에 전달하였기 때문이며 응고점보다는 높은 온도로 유지가 되어야 한다. two-tank 축열시스템에서는 직접 또는 간접 방식



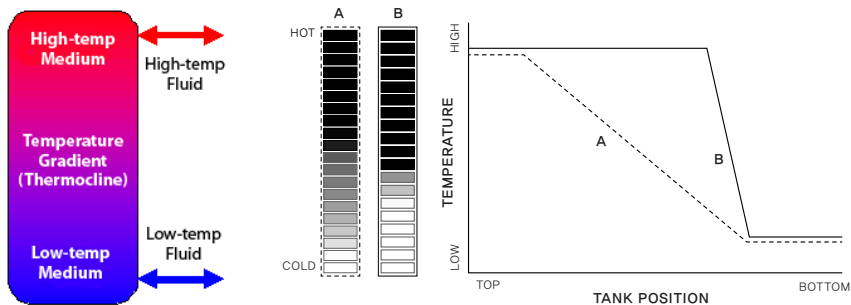


[그림 5] two-tank 시스템(좌 : direct type at the Solar Two power plant, 우 : indirect type for AndaSol-1 and-2)<sup>7)</sup>

으로 축열이 이루어진다. 직접 방식에서는 축열 물질은 열전달 매체로서의 역할도 하고 있는데 태양 열 에너지의 리시버(receiver)로 이송되어 직접 가열된다. 간접 방식에서는 태양열 에너지를 받는 열전달 매체와 축열 물질이 서로 다른 물질로 이루어져 있으며 두 매체 간의 열교환을 위한 대향류 열교환기가 전형적으로 사용된다. 간접 방식은 직접 방식에 비해 부가적인 열교환기의 설치 및 낮은 효율을 발생시킨다. 이상적인 축열 물질은 작동 영역에서 고화가 발생하지 않는 물질이나 현재 적용되고 있는 물질은 낮은 녹는점과 제한된 고온부 온도, 또는 높은 고온부 온도와 높은 녹는점의 조합으로 되어 있어서 향후 운전 온도의 확대를 위하여 연구가 필요하겠따(그림 5).

Thermocline 축열시스템은 축열시스템의 비용을 줄이는 노력의 일환으로 진행되어 왔는데 하나

의 탱크를 사용하고 탱크 내에서의 열적 성층화가 되도록 저온, 고온에서 단일 유체의 밀도차에 의존한다. thermocline 축열시스템에서 에너지를 저장하기 위하여 저온의 유체가 탱크의 밑에서부터 방출되고, 가열된 후 탱크의 상부로 재유입된다. 이러한 thermocline 축열시스템의 기술적 경제적 큰 도전은 탱크 내의 온도 구배이다. 온도 구배는 하나의 탱크 내에 고온과 저온 유체가 존재하므로 발생하는 물리적 현상으로 시스템의 엑서지 효율을 감소시키는데 시스템으로부터 얻을 수 있는 에너지를 감소시키게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 “active thermocline management”라는 기술이 개발되었다. “active thermocline management”은 온도 구배 근처에서 열전달 매체를 추출하여 탱크 내에서 보다 급격한 온도 경계(고온과 저온)를 유지하도록 하는 기술이다. 이러한 기술의 문제점은 추가적인 밸브



[그림 6] one tank thermocline thermal energy storage system<sup>7), 8)</sup>

등의 비용 증가와 저장 유체의 다양한 온도에서의 작동상의 어려움 등이 있다. “floating barrier”의 적용을 통해 고온부와 저온부의 분리를 시도하는 기술적 접근도 제안되었다. Thermocline 축열시스템은 하나의 탱크를 사용하기 때문에 탱크에서의 고장에 대비하여 백업용 탱크를 필요로 하고 있다. 이러한 것들은 비용의 증가를 유발하므로 도전적인 시도라 할 수 있다(그림 6).

Two-tank 시스템에 대하여 비용을 절감하는 또 하나의 기술로 packed bed 시스템이 있다. Packed bed 시스템은 하나의 저장탱크를 사용하고 자갈과 같은 비용효과적인 고체 삽입재를 탱크 내에 충전하여 더 고가의 열전달 물질의 필요한 부피를 줄이고자 하는데 의미가 있다. 이 시스템은 고온의 열전달 유체를 저온의 층상(자갈 등)으로 통과시켜 열에너지를 충전시키고, 이후에 유체를 역으로 순환시켜 차가운 유체를 새롭게 고온이 된 층상으로 통과시켜서 열에너지를 흡수하도록 한다. 위의 두 시스템과 유사하게 직접 또는 간접 방식이 있다. Packed bed 시스템은 탱크 내 온도 구배가 존재하므로 thermocline 시스템과 동일한 문제점을 안고 있다. 뿐만 아니라 고체 삽입재로 인한 열매체 오염, 압력강하, 저장탱크의 열래치팅(thermal ratcheting) 등에 대한 문제를 내포하고 있다. 이 가운데 열래치팅은 보다 심각한 문제로 충전재와 용기 사이의 열팽창 계수가 다르기 때문에 발생하게 되며 시간이 지남에 따라 용기 구조에 심각한 변형을 초래할 수 있다.

## 결 어

에너지 효율에 대한 관심이 높아지면서 발전플랜트에서는 더욱 높은 온도를 이용하여 전기를 생산하고자 하는 노력이 진행 중이다. 이와 더불어 발

생되는 폐열에 대한 활용도 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 태양열 발전시스템에서 다루고 있는 열매체의 온도는 매우 고온에 해당한다. 이와 같은 시스템에서 열의 효과적인 활용은 열에너지를 저장하고 필요시에 꺼내어 쓸 수 있는 열저장 시스템이 필수적이다. 따라서 고온 축열에 대한 기술은 매우 중요하며 축열 물질, 저장탱크, 시스템 운영 및 신뢰성 등에 대한 집중적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. <http://www.seia.org/policy/solar-technology/concentrating-solar-power>.
2. U.S. Department of Energy, 2014 : The Year of Concentrating Solar Power, May 2014.
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power).
4. <http://www.sbcenergyinstitute.com/Publications/SolarPower.html>.
5. 이인환, 조성렬, 2010, 대우엔지니어링 기술보 제26권 제1호.
6. NREL, Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants, NREL/SR-550-27925, Sep., 2000.
7. <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/concentrating-solar-power-thermal-storage-system-basics>.
8. Joseph Stekli, Levi Irwin, Ranga Pitchumani, 2013, Technical Challenges and Opportunities for Concentrating Solar Power with Thermal Energy Storage, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, June 2013, Vol. 5. 