

계절 간 흡착 열저장 기술

기존 축열시스템과 비교하여 현저히 높은 열에너지 저장 밀도를 가지는 물리/화학 흡착 반응을 이용한 계절 간 열저장기술을 소개하고자 한다.

화석연료 사용의 규제 및 에너지 단가 상승으로 인한 신재생 열원 및 폐열원의 활용이 관심을 받는 시점에서, 열원의 공급 및 수요 간 발생하는 공간과 시간 상의 괴리는 축열시스템의 필요성을 절대적으로 요구하게 한다. 태양열의 사용은 신재생 열원의 사용분야에 있어서 가장 유망한 후보군 중의 하나이나, 기술적, 경제적인 문제에 있어서의 제약으로 시스템의 실용화와 대형화에 있어 큰 도전에 직면하고 있다. 태양열을 비롯한 신재생 열원의 공급은 공급이 지속적으로 발생하는 시점에 있어서도 안정성 면에서 만족스럽지 않다는 어려움이 있다. 이러한 점들은 열저장 시스템의 필요성을 한층 더 요구하게 되는 요인이 될 수 있다.

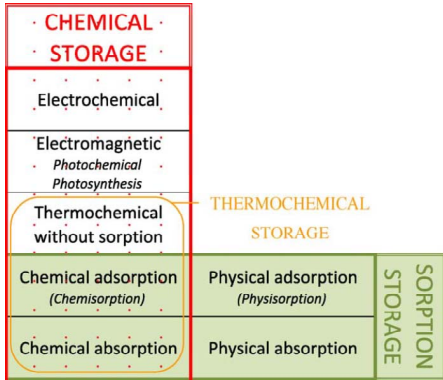
열저장에 있어 이미 상용화되어 있고, 기술적인 면에서 완성도를 가지는 접근은 현열 및 잠열을 이용하는 기술이다. 현열 열저장은 저장 매체의 온도를 상승시켜 열에너지를 저장하는 기술로, 열저장 에너지 밀도는 저장 매개체의 비열에 단순 비례하게 된다. 지중 온수조 형태의 지하대수층, 천공, 동굴 또는 도양층 내 유로 등을 활용하는 방법들이 유럽에서 일반적으로 상용화되어 있다. 잠열을 이용한 열저장 기술은 저장 매개체의 상변화 시 수반되는 흡/방열되는 잠열량을 열저장에 이용한다. 상변화 물질(PCM) 이 고체 상에서 액체 상으로 변환 시 흡수하는 열에너

이재선

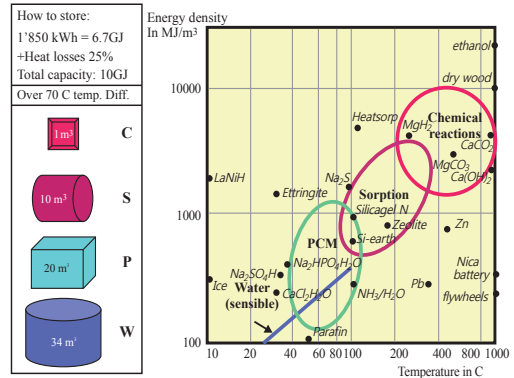
울산과학기술원(UNIST)

조교수

JaeseonLee@unist.ac.kr



[그림 1] 화학 열저장 및 Sorption 열저장의 분류²⁾



[그림 2] 열에너지 저장 방법에 따른 저장 밀도의 비교³⁾

지의 양이 저장되는 열에너지의 양에 상응하며, 다시 응고 시 방출되는 열량을 이용하게 된다. 현재까지 150종 이상의 PCM이 열저장에 이용될 수 있는 것으로 보고되고 있으며,¹⁾ 이러한 잠열 열저장 기술은 특정 온도(용해/응고점)에서만 반응을 한다는 특징이 있다. 잠열 열저장 시스템은 현열대비 5~14배 이상의 열저장 밀도를 가진다는 장점이 있다. 이와 같은 현열 및 잠열 열저장 시스템은 온도 변화에 따른 열손실을 피할 수 없다는 점에 있어 단점이 있으며, 장기간의 저장이 필요한 계절 간 열저장에는 적합하지 않게 된다.

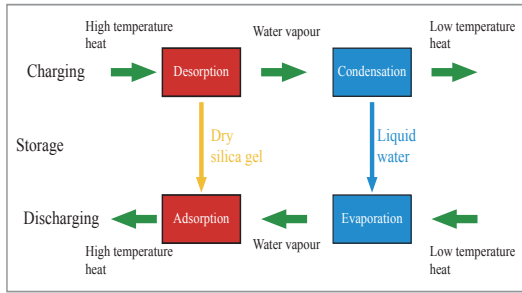
화학반응의 일종인 흡착(adsorption) 또는 흡수(absorption)를 통칭하는 Sorption 열저장은 여러 화학 열저장의 한 가지 방법이며, 통칭 Sorption Storage 기술로 불린다. 화학 열저장이라는 단어의 정의 자체는 매우 포괄적이며, 그림 1에 그 분류가 제시되어 있다.

고체상의 흡착제 표면에서 발생하는 결합에너지의 생성 및 해리 과정의 반응열을 열저장에 이용하는 기술은 특별히 흡착 열저장으로 분류되어야 하며, 본 원고에서는 다루는 내용은 이에 한정하기로 한다. 다시 이러한 흡착 열저장은 흡착제(adsorbent)의 표면 상에서 기체 상 또는 증기 상의 흡착기체(adsorbate)가 분자간력(Van der Waals

force)에 의해 결합되는 물리 흡착(Physisorption)과 결합력이 원자가력(Valency force)에 의해 결합되는 화학 흡착(Chemisorption)으로 분류된다. 일반적으로 후자의 경우 결합력이 더 크기 때문에 보다 큰 열에너지 저장 밀도를 기대할 수 있게 된다. 이러한 흡착 열저장은 현열 또는 잠열 소재에 비해 훨씬 큰 저장 밀도를 가지게 되며, 저장 사이클의 반복성 및 저장 간 열에너지 손실을 최소화할 수 있다는 점에서 각광받고 있다. 특히 흡착 및 탈착 반응이 일어나는 시점에서만 열에너지의 출입이 있다는 사실은 저장 간 열에너지 손실을 원천적으로 차단할 수 있고, 이러한 점에서 장기간의 열저장이 요구되는 계절 간 축열시스템의 적용이 가능하게 한다. 그림 2는 현열, 잠열 및 흡착 열저장 저장 매체 간의 저장 밀도와 반응 온도대를 비교하고 있다. 흡착 열저장의 경우 잠열 대비 최소 2배의 저장 밀도 증대와 상대적으로 고온 열원의 저장성을 나타내고 있다. 그러나 저장 매개체의 선택에 따라 저온대의 열원 또한 저장이 가능하다.

기술의 개념적 소개 : 흡착 열저장

흡착제(예 : 실리카겔, SiO₂)는 일반적으로 증기 상태의 흡착기체(예 : 수증기)를 표면에 결합(흡착)



[그림 3] 실리카겔(SiO₂) 흡착 열저장 시스템의 저장 사이클⁴

시킨다. 이러한 흡착기체(물분자)가 흡착제(실리카겔) 표면에 결합하는 반응은 동시에 열에너지를 방출하는 발열 반응이며, 반응 온도는 그 결합에너지의 크기에 비례하게 된다. 흡착 후 흡착 표면의 구조가 화학적으로 변하지 않는 경우를 물리 흡착으로 분류하며, 이러한 물리 흡착제의 예로는 실리카겔(Silica gel), 제올라이트(zeolites) 등이 있다. 화학 흡착의 경우는 흡착기체와 흡착제가 결합 후 반응하여 새로운 화학 구조물이 생성되는 경우로, 산화 마그네슘(MgO)이 수분 흡착 후 수산화마그네슘(Mg(OH)₂)의 경우나 석고(Ca(SO)₄)의 수화 반응 등이 그 예가 되겠다. 화학 흡착의 경우에도 물리 흡착의 경우와 같이 흡착 시 열에너지가 방출된다.

그림 3의 실리카겔-수증기 열저장 사이클에서 나타난 것처럼, 열저장(charging, 하절기 열원의 저장) 과정에서 외부로부터 공급되는 열(예: 태양열)은 결합되어 있는 실리카겔과 수증기의 가역적인 결합을 끊어주게 하며, 이러한 탈착(Desorption)과

정을 통해 흡착제는 건조 상태로 유지가 된다. 분리된 수증기는 폐쇄형 시스템의 경우 액상으로 응축되어 보관되거나, 개방형 시스템의 경우 외부로 배출된다.

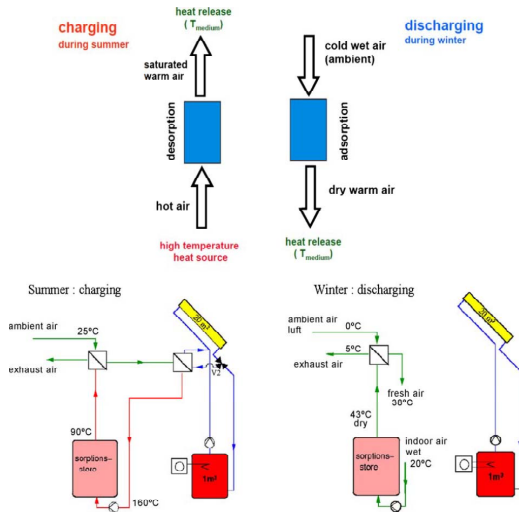
다시 열회수(Heat recovery, 동절기 열에너지의 활용) 또는 방열(Discharging) 과정에서는 외부로부터 습공기(개방형 시스템) 또는 보관된 액상의 물을 기화시켜 수증기를 건조 상태의 흡착제에 보내 주어 흡착 반응을 발생시킨다. 이 과정 중에 발생하는 반응 열을 회수하여 열원의 공급이 필요한 곳에 사용하게 된다. 이러한 흡착 열저장 시스템은 저장 기간 동안의 열손실을 근본적으로 막을 수 있다는 점에서 장점이 있다. 열저장 과정 후 흡착제와 기체가 분리되어 있는 한 흡착 반응 엔탈피는 외부 온도가 계절적 요인 등으로 변화하더라도 그대로 유지된다. 일반적인 실리카겔의 열저장 밀도는 180 kWh/m³, 합성 제올라이트의 경우 220 kWh/m³에 이르며, 이는 일반 잠열 열저장 밀도의 최소 2~3배에 이르는 양이다. 그림 4는 흡착 열저장에 이용되는 다양한 형상의 제올라이트를 보여주는 것으로, 저장 간의 반응성을 개선하기 위한 다양한 제형의 변화를 시도할 수 있다.

시스템 개발 사례

지난 1990년대 후반기 이후로 흡착 반응을 이용한 열저장 시스템 관련 연구가 유럽을 중심으로



[그림 4] 다양한 형태의 열저장 용 제올라이트(좌로부터 환형, 펠렛 및 채널 성형 블록 형)⁴



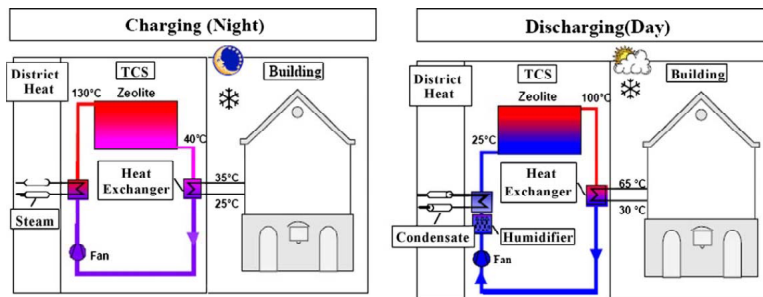
[그림 5] ITW Monosorp 작동 원리⁶⁾

활성화되었으며, 현재까지 유럽의 여러 기관에 의해 수행된 프로젝트 사례가 보고되고 있다. 다음은 관련 주요 프로젝트명 및 구체적 개발 사례를 나열한 것이다.

- HYDES(High energy density sorption heat storage) : 태양열 에너지를 이용한 난방 시스템, 1998~2001년, European Commission 및 오스트리아 정부 스폰서에 의해 수행된다.⁵⁾ 태양열 집열기로부터의 열원을 이용 20.4 m³ 공간의 난방 및 온수 공급을 위한 시스템 개발을 수행한다. 실리카겔을 이용한 물리 흡착 반응을 이용한 것으로

150 kWh/m³의 저장 밀도를 구현한다.

- MODESTORE(Modular high energy density heat storage) : HYDES 프로젝트의 결과를 기반으로 2003~2006년 수행, European Commission 및 오스트리아 정부 스폰서.⁶⁾ 실리카겔 및 수증기를 이용한 물리 흡착을 마찬가지로 이용하는 시스템이며, 반응기 및 열교환기 등을 한 개의 블록으로 설계하는 시도를 하였다. 그러나, 상대적으로 저장 밀도는 HYDES의 경우보다 감소하여 50 kWh/m³ 정도의 저장 밀도를 보여준다. 이는 사용된 태양열 집열기의 온도 상승이 충분치 않아 결과적으로 탈착 반응이 충분히 일어나지 않은 것으로 결론지어진다. 실리카겔 대신 대체 저장 매체(SWS-1L, 미츠비시 FAM-Z02 등)의 적용을 제안한다.
- IEA Task 32 : ‘advanced storage concepts for solar and low energy buildings’, 2003~2007년 수행, 개념 별 및 기관별 흡착, 흡수 및 화학 열 저장 세부 과제를 수행한다.⁷⁾
 - ITW Monosorp : 독일의 Stuttgart 대학 연구진에 의해 수행된 프로젝트로 8 m³의 제올라이트 4A를 이용한 물리 흡착 축열시스템의 개발 사례이다.³⁾ 개방형 흡착 루프를 사용하는 시스템으로, 여름철 잉여의 집열기 공급열로 공급 공기를 가열하여 흡착제를 건조시킨다. 다시 겨울철 실내의 습공기를 건조상태의 흡착제에



[그림 6] 원천 지역난방에 연결된 개방형 흡착 축열시스템⁹⁾

통과시키고, 이때 발생하는 흡착열을 건물의 난방에 이용한다(그림 5). 제올라이트 4A의 탈착반응이 상대적으로 고온(180°C)에서 일어나게 되어 태양 집열기의 성능 제약을 받는다.

- 독일 ZAE Bayern에 의해 수행된 프로젝트는 특별히 계절 간의 열저장을 목표로 수행된 것은 아니나, 개방형 열저장 시스템을 지역난방의 보조로 활용한 사례이다.⁹⁾ 부하의 피크가 지난 시점에 가용한 지역 난방열을 흡착 축열조에 저장하고, 이를 다시 피크 부하에서 보조 난방 열원으로 활용한 사례이다. 최대 출력 135 kW의 열원을 14시간 동안 1300 kWh 열량으로 학교 건물에 공급한다. 제올라이트 13x를 흡착제로 사용했으며, 뮌헨의 지역난방 라인에 직접 연결되어 적용된다(그림 6).
- IEA SHC Task 42 : 새로운 소재 및 시스템 기술을 적용한 콤팩트 열저장 기술 개발, 2009~2015년 수행.¹⁰⁾ 화학 열저장(TCM) 외에 현열, 및 잠열 열저장을 포괄적으로 아우르며, 다양한 저장 매체와 응용 분야에 폭넓게 적용되는 콤팩트 축열시스템의 개발을 목표로 하는 집단 성격의 프로젝트 수행 사례이다. 실질적으로 현재도 지속되고 있는 프로젝트이다.

실용화의 문제점 및 향후 전망

근래 들어 흡착 및 화학 축열시스템이 미래의 열저장 시스템으로 각광을 받고 있으나, 현 단계에서 풀어야 할 많은 기술적 이슈들도 여전히 산재해 있다. 아래에 앞으로 해결되어야 할 문제점을 나열해 본다.

- 흡착 및 화학 열저장 시스템의 복잡성으로 단순 흡착 소재 및 저장 매체의 열저장 밀도는 월등히 현열 및 잠열 시스템에 비해 높으나 부속 시스템

(열교환기 및 응축수 탱크 등) 고려 시 부피 당 저장 밀도의 장점이 퇴색되게 된다. 따라서 이를 개선하기 위한 전체 시스템 부피를 줄이고 열교환기 등의 효율이 크게 개선될 필요가 있다.

- 고가의 흡착제, 열교환기 등의 부속 요소기기 추가 및 유지 보수 등의 문제로 시스템 설치 비용이 크게 증가하게 된다.
- 흡착 및 탈착 반응의 속도가 충분히 빠르지 않아 순간 출력이 낮아지는 경향이 있다. 특히 고체상의 흡착제를 사용하게 되는 경우, 물질 전달 및 열전달의 비효율성에 따른 반응 속도의 감소는 크게 개선되어야 할 사항이다.
- 흡착 및 화학 축열시스템은 반드시 저온 열원을 필요로 하게 되는데, 본질적으로 이 저온 열원으로부터 공급받은 열에너지를 유용한 고온 열원으로 변환하게 되는 과정이다. 따라서 기술의 경쟁력을 위해서는 이러한 가용 저온 열원의 확보가 보장되어야 한다.
- 계절 간 축열시스템에서 흡착기제로 사용되는 물의 파이프 내 동결문제가 항상 발생할 수 있다.
- 흡착 및 탈착 사이클의 반복에 따라 흡착체의 성질이 변화될 가능성이 상존한다.
- 폐쇄형 시스템은 개방형 시스템에 비해 더 복잡성의 정도가 심해지는데, 특히 물의 응축 기화가 저온에서 발생해야 하기 때문에 내부는 항상 진공상태를 유지해야 한다.
- 현재 사용되고 있는 흡착제는 기존의 흡착 냉방 및 히트펌프를 위해 개발 적용된 소재들로 열저장에 최적화되어 있다고 말하기 힘들다. 따라서 앞으로 보다 많은 연구 개발을 통해 소재의 최적화 및 선정이 이루어질 필요가 있다.

결론

화학 축열 특히 흡착 반응을 이용한 열저장 시스템

템은 열에너지 저장 밀도에 있어 기존의 현열 및 잠열 시스템에 비해 월등히 높다는 장점과, 저장 간의 열손실을 근본적으로 막을 수 있다는 점에서 각광을 받고 있는 에너지 저장 기술 개념이다. 최근 10여년 이상 전 세계의 연구진들에 의해 개념의 검증 작업이 수행되었고, 다양한 축열 소재 및 시스템에 대한 실험 및 해석 등이 동시에 수행되어 왔다. 일부 검증 사례에서 상당히 희망적인 연구 결과가 제시되고 있기도 하지만, 많은 경우 아직 풀어야 할 기술적 난제 및 이슈 들이 여전히 존재하고 있는 상황이다. 시스템의 상대적 복잡성 및 소재, 화학 반응, 요소기기 설계, 열 및 물질 전달 등에 있어서의 개별 성능 개선 외에 이들을 포괄하는 시스템 차원의 융합적인 연구 노력이 요구되는 분야라 하겠다. 특히 관련 연구가 활성화되지 못한 국내 연구 환경에서 유럽의 선형 성과와 경쟁하기 위해 후발 주자로서 각별한 분발이 필요한 상황이라는 인식이 필요한 때이다.

참고문헌

1. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., and Mehling, H., 2003, Review on thermal energy storage with phase change : materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 251-83.
2. K. Edem N'Tsoukpoe, Hui Liu, Nolwenn Le Pierre's, Lingai Luo, 2009, A review on long-term sorption solar energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 2385-2396.
3. Bales, C., Solar Energy Research Center(SERC), Chemical and sorption heat storage, In : Proceedings of DANVAK seminar, DANVAK seminar (solar heating systems—Combisystems—heat storage), November 2006.
4. SAIC Canada, Compact thermal energy storage technology assessment report, Document No. CM002478, May 2013.
5. Nunez, T., Henning, H-M., and Mittelbach, W., High energy density heat storage system—achievements and future work. In : Proceedings of 9th international conference on thermal energy storage, Futurestock 2003.
6. MODESTORE Modular High Energy Density Sorption Storage, www.ise.fhg.de.
7. Bales C., 2008, Laboratory tests of chemical reactions and prototype sorption storage units, www.iea-shc.org.
8. Kerskes H., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Seasonal sorption heat storage. DANVAK seminar(solar heating systems—Combisystems—heat storage), DTU Lyngby, Denmark, 14, November 2006.
9. Hauer, A., 2002, Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications. In : Proceedings of 3rd workshop of annex 17 ECES IA/IEA.
10. International Energy Agency(IEA). Compact thermal energy storage : material development and system integration, 2008. epos.ecn.nl. 