TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 22, No. 4, 2012, pp. 243-256 http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2012.22.4.243

ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

지하공동 열에너지 저장을 위한 축열 매질의 기술 현황 검토 박정욱, 박도현*, 최병희, 한공창

Review on Thermal Storage Media for Cavern Thermal Energy Storage

Jung-Wook Park, Dohyun Park*, Byung-Hee Choi, Kong-Chang Han

Abstract Developing efficient and reliable energy storage system is as important as exploring new energy resources. Energy storage system can balance the periodic and quantitative mismatch between energy supply and energy demand and increase the energy efficiency. Industrial waster heat and renewable energy such as solar energy can be stored by the thermal energy storage (TES) system at high and low temperatures. TES system using underground rock carven is considered as an attractive alternative for large-scale storage, because of low thermal conductivity and chemical safety of surrounding rock mass. In this report, the development of available thermal energy storage methods and the characteristics of storage media were introduced. Based on some successful applications of cavern storage and high-temperature storage reported in the literature, the applicabilities and practicabilities of storage media and technologies for large-scale cavern thermal energy storage (CTES) were reviewed.

Key words Thermal energy storage (TES), Cavern thermal energy storage (CTES), Storage media, Sensible heat storage, Latent heat storage

초 록 에너지의 효과적인 저장과 관리는 에너지 공급과 수요의 시간적·양적 불균형을 해소하고, 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다는 점에서 새로운 에너지원을 개발하는 일만큼 중요하다. 열에너지 저장 시스템은 산업폐열이나 태양열과 같은 열원 기반의 에너지를 저장하는 시스템으로서, 대용량 저장 시설에 암반 지하공동을 활용하는 경우 주변 암반의 낮은 열전달 특성과 높은 화학적 안정성을 통해 보다 효율적인 저장 시스템을 구축할수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 열에너지 저장 방식과 저장 매질의 일반적인 특성과 열에너지 저장사례에 대하여 살펴보고, 지하공동을 활용한 열에너지 저장 시스템에 대한 각 저장 매질의 적용성에 대해 개괄적으로 검토하였다.

핵심어 열에너지 저장, 암반공동 열에너지 저장, 저장 매질, 현열축열, 잠열축열

1. 서 론

열에너지 저장(thermal energy storage, TES) 시스템 은 산업폐열, 지열, 태양열과 같은 열원 기반의 에너지 를 다른 형태로 변환하지 않고 그대로 저장해 두었다가,

Received: Jul. 9, 2012 **Revised:** Jul. 23, 2012 **Accepted:** Aug. 6, 2012

*Corresponding Author: Dohyun Park Tel) +82428683913, Fax) +82428683416

E-Mail) parkdo@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350

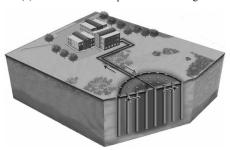
Korea

최종 소비처의 용도에 따라 냉난방용 열원으로 공급하거나 전력 생산에 활용하는 것을 의미한다. 열에너지의 효과적인 저장 및 활용은 잉여 열원을 적절히 회수·저 장하여 유효 열원을 안정적으로 확보함으로써 에너지 공급과 수요의 시간적·양적 불균형을 해소하고, 에너지 이용효율을 향상시키는 기능을 수행할 수 있다.

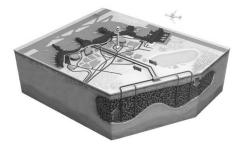
열에너지 저장 시스템은 냉난방과 건물에너지 시스템 관련 분야에서부터 전자 장비의 안정성을 확보하기 위한 냉각 분야, 의류 및 직물 분야 등과 같은 다양한 범위에 걸쳐 연구되고 있으며, 저온 영역에서의 열에너지 저장 기술들은 상업적인 목적으로 널리 응용되고 있다(김진수와 강용혁, 2006). 비교적 대용량의 열에너지를 저장하는 시스템의 경우, 철재컨테이너와 같은 지상탱



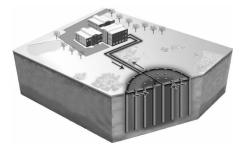
(a) ATES Summer operation - cooling



(c) BTES Summer operation - cooling



(b) ATES Winter operation - heating



(d) BTES Winder operation - heating

Fig. 1. Seasonal thermal storage using ATES and BTES (source: http://www.underground-engery.com)

크나 암반 내 지하공간이 활용될 수 있으며 후자의 경 우를 지하 열에너지 저장(underground thermal energy storage, UTES)이라고 한다.

UTES는 그 형태와 방식에 따라서 대수층 열에너지 저장(aquifer thermal energy storage, ATES), 보어홀 열에너지 저장(borehole thermal energy storage, BTES), 지하공동 열에너지 저장(cavern thermal energy storage, CTES)으로 구분할 수 있다. ATES는 열수(온열 또는 냉열)를 주입정과 생산정을 통하여 유동시킴으로써 대 수층 내 지하수와 광물에 열에너지를 저장하였다가 회 수하는 방식이며, BTES는 암반 자체를 에너지 저장 매 질로 활용하여 시추공의 열교환기(heat exchanger)를 통해 열을 저장·회수하는 방식이다(Fig. 1). ATES와 BTES는 계절별 온도 조건에 따라 유동적으로 운영될 수 있으며, 유럽, 미국, 중국, 캐나다 등의 국가를 중심 으로 공항, 공공건물, 대형빌딩 등 다양한 시스템에 적 용되어 왔다. 이중 10 MW 이상의 대규모 시설들로는 노르웨이 Oslo Gardermoen 국제공항, 스웨덴 Arlanda 국제공항, 네덜란드 Technical University of Eindhoven 등이 있다(Shim and Lee, 2010). 한편, CTES는 암반의 높은 화학적 안정성과 기밀성, 낮은 열전달 특성 등을 활용하여 지하공동에 열에너지를 저장하는 방식으로서, ATES, BTES와는 달리 다양한 형태의 저장 방식과 매 질이 활용될 수 있으므로 고온의 원자로열이나 산업폐 열, 태양열 등의 대규모 저장 시스템에도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 국내외적으로 CTES를 적용한 열에너지 저장 사례가 많지 않을 뿐만 아니라, 물 이외의 다른 저장 매질을 적용하는 문제에 대해서는 아직연구 단계에 있는 실정이다. 국내에서는 현재 한국지질 자원연구원을 중심으로 암반의 지하공동을 활용한 대용량 열에너지 저장 시스템의 개념모델에 대한 연구가진행 중에 있다.

본 연구에서는 열에너지 저장 방식과 저장 매질의 일 반적인 특성과 현재 성공적으로 운영되고 있는 몇몇 열 에너지 저장사례에 대하여 살펴보고, CTES 시스템에 대한 각 저장 매질의 적용성 및 효율성에 대하여 개괄 적으로 검토하였다.

2. 열에너지 저장 방식

TES는 저장되는 열에너지의 형태와 저장 매질에 따라 단순히 물질의 온도 차이를 이용하는 현열축열 (sensible heat storage) 방식, 물질의 상변화에 수반되는 열에너지를 이용하는 잠열축열(latent heat storage) 방식, 그리고 흡열반응과 발열반응의 사이클을 이용하는 화학축열(chemical energy storage) 방식으로 구분할 수 있다(Fig. 2).

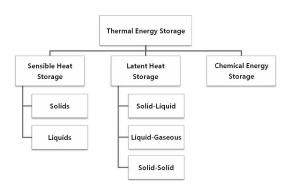


Fig. 2. Classification of TES methods

2.1 현열축열(Sensible heat storage) 방식

현열축열은 물질의 온도차와 비열을 이용하여 열에너지를 저장하는 방식으로 저장 물질의 상(phase)에 따라액상축열과 고상축열로 나뉜다. 기상 물질의 경우 밀도가 작아 축열 효율성이 결여되므로 저장 물질로 적합하지 않다. 현열축열의 저장물질은 사용 온도 조건에서 상변화를 일으키지 않고 화학적 안정성을 유지할 수 있어야 한다. 또한 높은 저장 밀도와 시스템의 운전 사이

클에 대한 열적 안정성, 그리고 저장 환경(저장 탱크, 지하공동 등)에 대한 적합성 등이 요구된다.

현열축열을 통해 물질에 저장되는 열에너지는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

여기서, Q는 온도차에 의해 물질에 저장된 열에너지 [J], m은 물질의 질량[kg], C_p 는 물질의 비열 $[J/(kg \cdot K)]$, T_H 와 T_L 은 각각 높은 온도와 낮은 온도 $[K \text{ or } \mathbb{C}]$, C_{op} 는 물질의 온도 범위 내 평균 비열 $[J/(kg \cdot K)]$ 을 의미한다. 액상축열의 매체로는 사용 온도에서 액체 상태를 유지하는 물, 오일류, 용융염, 나트륨(sodium) 등이 있다. 액상 현열축열은 유동성 있는 액체를 매질로 사용하기 때문에 열저장 및 회수에 있어 대류에 의한 원활한 열전달을 기대할 수 있으며, 저장 매질 자체를 열전달유체(heat transfer fluid, HTF)로 동시에 사용될 수 있다는 큰 이점을 가지고 있다. Table 1은 현열축열 시스템에 사용될 수 있는 액상축열 재료의 특성 및 가격을 요약한 것이다. 여기서 재료의 가격은 1991년에 발표된

Table 1. Candidate liquid storage media for TES (Geyer, 1991, Ataer, 2008, Gil et al., 2010)

Storage medium	Temperature $(^{\mathbb{C}})$	Average density (kg/m³)	Average thermal conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh/K m³)	Media costs per kg (\$/kg)
Water	0 - 100	1000	0.63 (at 38℃)	4.2	1.17	-
Mineral oil	200 - 300	770	0.12	2.6	0.56	0.30
Dowtherms (Synthetic oil)	12 - 260	867	0.112 (at 260°C)	2.2	0.53	-
Therminol 55 (합성오일)	-18 - 315	-	-	2.4	-	-
Therminol 66 (Synthetic oil)	-9 - 343	750	0.106 (at 340°C)	2.1	0.44	-
Silicone oil	300 - 400	900	0.10	2.1	0.53	5.00
Hitec (Molten salt)	141 - 540	1680	0.61	1.56	-	ı
Draw salt (Molten salt)	220 - 540	1733	0.57	1.55	0.75	
Nitrite salts (general)	250 - 450	1825	0.57	1.5	0.76	1.00
Ntrate salts (general)	265 - 565	1870	0.52	1.6	0.83	0.70
Carbonate salts	450 - 850	2100	2.0	1.8	1.05	2.40
Liquid sodium	270 - 530	850	71.0	1.3	0.31	2.00

Geyer의 연구 결과에 기초하므로 재료 간의 개략적 비교를 위한 자료 정도로 활용하는 것이 바람직할 것이다. 물은 100℃ 이하의 현열축열 분야에서 가장 일반적으로 사용되는 저장 물질로서 보통 주거 난방이나 생활 온수 등을 위한 비교적 저온의 응용 분야에서 사용되어 왔다. 다른 물질에 비해 밀도가 크지 않지만, 비열과 체적 열용량이 크고 저렴한 비용으로 손쉽게 구할 수 있

으며 시스템 구축이 간단하다는 장점이 있다.

오일류의 경우, 약 400℃ 이하의 온도 범위에서 사용이 가능하며, Dow 社의 Dowtherm이나 Solutia 社의 Thermin이과 같은 상용 제품이 널리 이용되고 있다. 오일류의 경우 시간의 흐름과 반복되는 운영 사이클에 따라 화학 반응을 통해 분해되거나 물성 변화를 일으킬수 있으며, 독성이나, 인화, 폭발의 위험이 내재한다는 단점이 있다. 특히, 경제성이 떨어져 특별한 경우의 소규모 저장 시스템을 제외하면 큰 이점을 지니지 못한다 (Ataer, 2008).

용융염(molten salt)은 액상축열 재료 중 고온의 열에 너지 저장에 가장 적합한 물질로 알려져 있다(Gil et al., 2010). 실제로, 이를 사용한 현열축열 방식은 현재 구축 중인 대규모 태양열 발전시스템에서 고려되는 가장 진보된 형태의 고온 축열 방식이기도 하다(김진수와 강용혁, 2006). 용용염은 보통 액상의 염을 지칭하지만, 용융점이 매우 높기 때문에 대부분의 경우 표준온도압력

(STP, standard temperature and pressure, 0°C, 1기압) 조건에서 고체 상태이다. 따라서 온도 강하에 따른 재료의 결정화를 방지해야 하며, 고온의 용융염을 운전하기 위한 각종 배관과 부속, 기계 장치의 설계와 적용 등많은 요소기술을 필요로 하고 있는 실정이다. 그러나낮은 매체 가격으로 인해 경제성이 높을 뿐만 아니라액상의 매체를 직접 순환시키므로 효과적인 열이송이가능하다. 또한 가연성과 독성이 없고, 저장밀도가 높다는 장점이 있다.

한편, 고상축열을 위한 매질로는 자갈, 콘크리트, 벽돌, 금속, 그리고 고상의 금속염 등이 있다. 고상축열의 경우, 일반적으로 충전층(Packed-bed)의 형태로 적용되어 왔으며, 열저장 매질 이외에도 기체나 액체의 열전달 유체를 필요로 한다. 액체를 열전달 유체로 사용하는 경우, 열용량이 매우 작은 기체와 달리, 열저장이 함께 이루어지므로 이를 dual storage system이라고 부른다. Table 2는 현열축열 시스템에 활용될 수 있는 고상재료의 특성과 가격을 요약한 것이다. 단, 재료의 가격은 1991년에 발표된 Geyer의 연구 결과에 기초하므로 재료 간의 비용을 개략적으로 비교하기 위한 자료로 활용하는 것이 바람직할 것이다.

고상축열에 가장 널리 사용되는 매질은 비용이 저렴한 자갈이나 콘크리트, 벽돌로서 저렴한 비용으로 축열 시스템을 구축할 수 있다는 장점을 갖지만, 체적당 열

Storage medium	Temperature $(^{\circ}C)$	Average density (kg/m³)	Average thermal conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh/K m³)	Media costs per kg (\$/kg)
Sand-Stone-Mineral oil	< 300	1,700	1.0	1.30	0.62	0.15
Concrete	< 400	2,200	1.5	0.85	0.52	0.05
NaCl	< 500	2,160	7.0	0.85	0.51	0.15
Cast iron	< 400	7,200	37.0	0.56	1.12	1.00
Cast steel	< 700	7,800	40.0	0.60	1.30	5.00
Silica brick	< 700	1,820	1.5	1.00	0.51	1.00
Magnesia brick	< 1200	3,000	5.0	1.15	0.96	2.00
Granite	-	2,640	1.73 - 3.98	0.82	0.60	-
Limestone	-	2,500	1.26 - 1.33	0.90	0.63	-
Marble	-	2,600	2.07 - 2.94	0.80	0.58	-
Sandstone	-	2,200	1.83	0.71	0.43	-
Dry Earth	-	2093	2.51	2.09	1.22	-
Wet Earth	-	795	0.25	0.80	0.18	-
Copper	-	8,954	385 (at 20°C)	0.38	0.95	-

Material	High temperature concrete	Castable ceramic
Density (kg/m ³)	2,750	3,500
Specific heat at 350°C (kJ/kgK)	0.92	0.87
Thermal conductivity at 350℃ (W/mK)	1.0	1.35
Coefficient of thermal expansion at 350°C (10-6/K)	9.3	11.8
Material strength	Medium	Low
Crack initiation	Several cracks	Hardly no cracks

Table 3. Material properties of storage media developed at DLR in German (Laing et al., 2006)

용량이 물의 약 1/2 수준으로 에너지 저장밀도가 현저히 작다. 또한 낮은 열전도도로 인해 열저장 및 회수 속도가 느리다는 단점을 갖는다. 실리카 벽돌이나 마그네시아 벽돌은 비교적 높은 온도에서의 축열이 가능하지만, 낮은 온도 영역에 활용되는 경우 다른 재질에 비해큰 장점을 갖지 못하며, 철은 열전도도가 매우 우수하나 비용이 비싸다는 단점이 있다. 경우에 따라 금속이나 고상의 금속염을 열저장 매체로 사용하기도 하는데, 저장 밀도가 높고, 열전도도가 양호하다는 장점에 비해가격이 비싸다는 단점이 있고, 부식성의 문제가 함께고려되어야 한다.

최근, 많은 연구들에서 콘크리트와 세라믹의 고상축열 매질로서의 경제성과 효율성이 보고되고 있으며 (Lovegrov et al., 1999, Tamme, 2003), Table 3은 독일 항공우주연구소 (DLR)에서 고온축열을 목적으로 개발된 특수 콘크리트와 세라믹의 열물성을 나타낸다(Laing et al., 2006).

2.2 잠열축열(Latent heat storage) 방식

잠열축열은 물질의 상변화 과정에서 흡수 또는 방출되는 에너지를 저장하는 방법으로, 액체 - 고체 상변화를 이용하는 경우가 대부분이다. 액체 - 기체 상변화와고체 - 기체 상변화는 더 많은 잠열을 수반하지만 두 상간의 부피 변화로 인해 저장 효율이 현저히 떨어지므로실질적 활용 대상이 되지 못하고 있다.

Fig. 3은 현열축열과 잠열축열의 원리를 간략히 나타 낸 그림으로, 저장 매질의 온도와 저장 에너지량의 관계를 보여준다. 잠열축열의 경우에는 물질의 상변화 온도 (T_{PC})가 저장 시스템의 운용 온도 범위 내에 포함되어 저장·회수 과정에서 용융과 같은 상변화가 발생하며, 상변화 과정에서 주위와 높은 열교환이 일어나지만물질의 온도는 변화하지 않는다. 따라서 축열매체와 열전달 유체간의 온도 차이가 20-30℃ 이상이 되어야 하는 현열축열과는 달리, 작은 온도차만으로 상변화를 통한 축열 및 방열이 가능하다. Shin 등(1987)에 따르면,

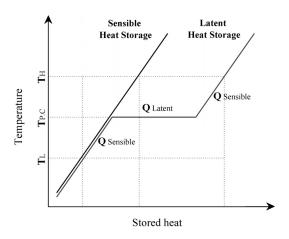


Fig. 3. Classification of TES methods

열효율이 65-75%인 현열축열에 비해, 잠열축열의 경우 85-95% 수준까지 높일 수 있다. 또한, 현열축열과 달리고온으로 저장할 필요가 없으므로 열손실과 단열비용을 절감할 수 있고 거의 일정한 온도에서 시스템의 운용이 이루어지므로 제어 및 운전 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 열저장 매질 이외에 열교환을 위한 열전달 유체를 필요로 하며, 이에 따른 효율 저하가 발생할 수 있다. 또한 용융점을 벗어난 온도에서는 저장효율이 낮아지기 때문에 축열 매질에 따라 시스템의 운용 온도 조건이 한정적이라는 단점이 있다.

잠열축열 재료를 보통 상변화물질(phase change material, PCM)이라고 하며, 일반적으로 액체-고체 상변화를 수 반하는 경우를 의미한다. 온도 변화에 따라 PCM에 축적되는 열에너지는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \int_{T_L}^{T_{PC}} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_{PC}}^{T_H} m C_p dT$$

$$= m \left[C_{sp} (T_{PC} - T_L) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_H - T_{PC}) \right]$$
(2)

여기서, Q는 저장된 열에너지[J], m은 물질의 질량

[kg], C_p 는 물질의 비열[J/(kg·K)], T_H 와 T_L 은 각각 높은 온도와 낮은 온도[K or $^{\circ}$ C], T_{PC} 는 용용점의 온도[K or $^{\circ}$ C], a_m 은 용용된 질량비, $\triangle h_m$ 은 단위질량당 용해열 (Heat of fusion unit mass)[J], C_{Sp} 와 C_{Ip} 는 각각 고상과 액상에서 물질의 평균 비열[J/(kg·K)]을 의미한다.

PCM에 대한 초기 연구에서는 약 30[°] 정도에서 상 변화하는 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 나 $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ 를 이용하는 것이 대부분이었으며, 현재까지 그 응용 분야는 수화염, 파라핀, 지방산 등 대체로 100[°] 이하의 온도 영역에 국한되어 있다.

PCM은 크게 유기성 물질(organic material)과 무기성

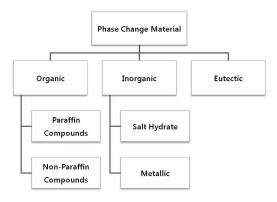


Fig. 4. CClassification of PCM

물질(inorganic material), 그리고 이들의 공융혼합물 (eutectic material)로 구분된다(Fig. 4). 유기성 물질은 파라핀계와 비파라핀계가 있으며, 대체로 취급이 쉬운물질들로서 적용 온도 범위가 다양하다. 과냉각(supercooling)이나 상분리(phase separation) 현상이 없다는 장점이 있으나 증기압이 높고 무기성 물질에 비해 축열용량이 작다. 여기서 과냉각 현상은 용융체 또는 액체가 평형상태에서의 상변화 온도 이하까지 냉각되어도 상변화를 일으키지 않고 잠열도 방출하지 않는 현상을 의미하며, 상분리 현상은 하나의 상을 형성하고 있는물질계에서 온도, 압력, 조성 등이 변화함에 따라 두 상으로 갈라지는 현상을 의미한다.

무기성 물질로는 염 수화물(salt hydrate)과 금속이 있으며, 일반적으로 용융잠열과 열전도도가 커서 축열매체로서 유리한 열역학적 특성을 가진다. 그러나 과냉각과 상분리 현상이 발생할 수 있고, 저장 용기와 재료의부식성이 크다는 단점이 있다. 여러 무기염이나 금속염의 공융화합물들은 조성 성분과 성분비에 따라 다양한열역학적 특성을 나타내며, 그 종류만도 수백 종에 달한다.

현재 다양한 PCM에 대하여 축열매체로서의 경제성과 효율성이 검토되고 있으며, 각 물질이 장단점을 가지므로 최선의 축열매체를 단정할 수는 없는 실정이다. Table 4와 Table 5는 각각 100℃ 이상의 비교적 높은

Table 4. Candidate organic PCMs for high temperature thermal energy storage (Zalba et al., 2003, Sharma et al., 2009)

Material	Melting point $(^{\circ}C)$	Latent heat (kJ/kg)	Latent heat (kJ/liter or kJ/kmol)
Isomalt $(C_{12}H_{24}O_{11} \cdot 2H_2O + C_{12}H_{24}O_{11})$	147	275	-
Adipic acid	152	247	-
Dimethylol propionic acid	153	275	-
Pentaerythritol	187	255	-
AMPL ((NH ₂)(CH ₃)C(CH ₂ OH) ₂)	112	28.5	2991.4 kJ/liter
TRIS ((NH ₂)C(CH ₂ OH) ₃)	172	27.6	3340 kJ/kmol
NPG ((CH ₃) ₂ C(CH ₂ OH) ₂)	126	44.3	4602.4 kJ/kmol
PE (C(CH ₂ OH) ₄)	260	36.9	5020 kJ/kmol
Catechol	104.3	207	-
Quinone	115	171	-
Acetanilide	118.9	222	-
Succinic anhydride	119	204	-
Benzoic acid	121.7	142.8	-
Stibene	124	167	-
benzamide	127.2	169.4	-
Methyl fumarate (CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242	-

Table 5. Candidate inorganic PCMs and eutectic PCMs for high temperature thermal energy storage (Zalba et al., 2003, Sharma et al., 2009)

Material	Composition (wt. %)	Melting point ($^{\circ}$ C)	Latent heat (kJ/kg)	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kg°C)	Thermal conductivity (W/m°C)
NaNO ₃	-	307	172	2260	-	0.5
KNO ₃	_	333	266	2110	_	0.5
KOH	<u> </u>	380	149.7	2044	-	0.5
NaCl		800	492	2160		5
Na ₂ CO ₃	<u>-</u>	854	275.7	2533	-	2
		897	235.8	2290	-	2
K ₂ CO ₃ NaOH		348	76	2130	2.09	0.84
	<u> </u>	450	76	- 2130	1.80	1.09
B_2O_3	-	430	70	1450 (liquid, 120°C)	1.60	
MgCl ₂ ·6H ₂ O	-	117	168.6	1450 (liquid, 120°C) 1569 (solid, 20°C)	-	0.570 (liquid, 120°C) 0.694 (solid, 90°C)
$Mg(NO_3) \cdot 2H_2O$	-	130	-	-	-	-
LiF	-	850	1800 MJ/m ³	-	-	-
KF	-	857	452	2370	-	-
MgCl ₂	-	714	452	2140	-	-
AlSi ₁₂	-	576	560	2700	1.038	160
Alsi ₂₀	-	585	460	-	-	-
NaF: BeF ₂	57: 43	360	78	-	1.84	4.19
NaF : NaBF ₄	12:40:44:4	384	31	1370	1.51	4.19
NaF : KF : L1F : MgF ₂	46.5:11.5:42	449	-	2160	-	-
LiF: NaF: KF	58:35:7	454	99	2.165	1.88	4.61
KF: NaF: MaF ₂	63.5:30.5:6	685	138	2090	1.59	-
LiF: MgF ₂ : KF	65:23:12	710	187	2182	2.01	7.12
Na : CaF ₂ : MgF ₂	65:23:12	745	133	2370	1.51	-
KCl : CuCl	33.3:66.7	150	19.2	2900	0.71	-
KCl : LiCl	41.5:58.5	361	56.42	-	-	-
KCl: NaCl: MgCl ₂	22:51:27	396	69	2220	-	-
NaCl : MgCl ₂	52:48	450	77	2240	1.09	-
KaOH: KOH	50:50	170	64	2080	1.67	-
LiOH: NaOH	30:70	210	87	1990	-	-
KOH : LiOH	71:29	227	65	1960	-	-
NaOH: NaNO ₂	73:27	239	68	2140	-	-
NaOH: NaNO ₂	20:80	235	57	-	-	-
NaOH: NaNO ₃	81.5:18.5	259	67	2170	-	-
Li ₂ CO ₃ : NaCO ₃ : K ₂ CO ₃	43.5:31.5:25	397	99	2308	1.67	1.97
K ₂ CO ₃ : MgCO ₃	57:43	460	-	-	1.47	-
Li ₂ CO ₃ : Na ₂ CO ₃	53.3:46.7	496	-	2060	-	2.30
Li ₂ CO ₃ : K ₂ CO ₃	50:50	505	82	1340	2.09	1.963
KCl : Na ₂ CO ₃	50:50	588	64	1.380	-	-
K ₂ CO ₃ : Na ₂ CO ₃	44:56	710	38	1510	1.67	1.985
KNO ₃ : NaNO ₃ : NaNO ₂	44.15:6.95:48.9	145	31	1550	0.54	1.787
NaNO ₃ : KNO ₃	50:50	225	26.3	1470	0.80	1.8
Na ₂ SO ₂ : CaSO ₄ : NaCl	45:3:52	485	56	1130	-	-
Na ₂ SO ₂ : KCl	39:61	517	53	1090	_	_
KNO ₃ : KCl	-	320	74	2100	1.21	0.5
LiF : CaF ₂	80.5:19.5	767	790	2670 (liquid) 2100 (solid)	1.84 (liquid) 1.97 (solid)	5.9 (liquid) 1.7 (solid)

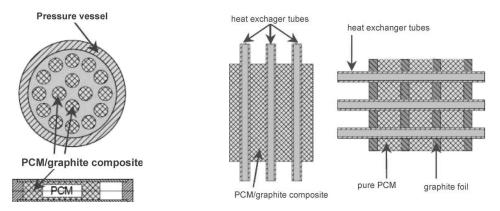


Fig. 5. Arrangement of PCM/graphite composite (Madrano et al., 2010)

온도 범위에서 상변화하는 유기성 PCM 재료와 무기성·공융혼합물 PCM 재료들의 특징을 나타낸 것이다. 고온축열 분야에 활용될 수 있는 대부분의 PCM 재료들은 과냉각 현상, 상분리 현상, 낮은 열전도도 등의문제를 가지고 있다. 과냉각 현상을 억제하고 결정화속도를 높이기 위해서는 보통 적절한 조핵제(nuleating agent)를 사용하여야 하며, 상분리 현상은 물질에 따라적절한 증점제(thickening agent)를 선정함으로써 해결할 수 있다. 한편, 낮은 열전도도 문제를 해결하기 위하여 액체 상태에서 대류를 유도하여 열전달을 촉진시키거나, 열전도도가 좋은 다른 물질을 PCM에 결합 또는 첨가하기도 한다. Fig. 5는 잠열축열 매질의 낮은 열전도도를 개선하고 열수송 유체와의 효과적인 열전달을 유도하기 위해 독일항공우주연구소(DLR)가 개발한 제안된 PCM/흑연 조합체의 모습을 보여준다.

2.3 화학축열(chemical heat storage) 방식

화학축열은 물질의 가역 화학반응(reversible reaction)을 이용하여 열에너지를 저장·회수하는 방법으로, 흡수기에서 흡열 화학반응을 수행하여 열에너지를 화학에 너지로 변환·수송한 후, 최종 열소비처에서 발열 화학반응을 통해 저장된 에너지를 방출시키는 일련의 반응사이클을 이용한다.

화학축열은 현열축열과 잠열축열에 비하여 에너지의 저장 밀도가 매우 높아 저장소를 소형화할 수 있을 뿐만 아니라 회수 효율이 높고 장기 축열이 가능하다. 또한 별도의 단열을 필요로 하지 않으므로 에너지 저장물질의 이송 및 저장이 용이하다는 점에서 고온 축열분야에서 유용하게 응용될 수 있는 기술이다. 그러나화학축열과 관련된 기술은 현재까지 실험실 수준의 연구에 머물러 있는 수준으로서, 상용화를 위해서는 화학

반응과 관련된 다양한 기술, 예를 들면 반응 메카니즘 의 규명, 촉매의 활용, 부반응의 억제, 반응물의 분리 및 순환, 시스템의 제어, 매체의 손실, 사용되는 장치의 재료 및 반응기 설계 등과 관련된 수많은 핵심 분야들에 대한 이해와 성취가 필요한 실정이다.

Table 6은 현재까지 화학축열과 관련된 연구들에서 고려된 화합물 및 그 화학 반응을 제시한 것이다(Van, 2005). 화학축열의 매체로서 기술적, 경제적으로 가장 적합하다고 알려져 있는 물질은 금속 산화물과 암모니아로서, 다음은 금속산화물 중 KO₂와 PbO₂의 화학반응을 보여준다.

$$4KO_2 + heat \leftrightarrow 2K_2O + 3O_2 \tag{3}$$

$$2PbO_2 + heat \leftrightarrow 2PbO + O_2$$
 (4)

흡열반응을 일으키기 위해서 KO_2 와 PbO_2 는 각각 300-800 °C, 300-350 °C의 온도를 필요로 하며, 2.1 MJ/kg, 0.26 MJ/kg의 열에너지 저장 밀도를 갖는다. 흡열반응에서 생산된 산소는 분리 수집하여 매우 유용하게 활용될 수 있다. 발열반응은 흡열반응에 비해 더 낮은 온도조건에서 반응이 일어나며, 여기에는 수집된 산소나 일반 공기가 이용된다.

Fig. 6은 화학축열 방식 중 암모니아의 분해 및 수소질소의 합성 반응 사이클을 이용한 태양열 발전 시스템의 개념도이다(Luzzi 등, 1999). 고온의 태양열을 이용하여 액상의 암모니아를 수소와 질소로 분리하여 저장이송하게 되며, 이후 발열반응인 암모니아 합성반응에서 발생된 열을 통해 발전 사이클을 구동하게 된다. 이때 사용되는 화학반응식은 다음과 같다.

$$2NH_3 + heat \leftrightarrow N_2 + 3H_2 \tag{5}$$

		Material energy	Reaction temperature	
Compound	Reaction		1	
	100000	density	(℃)	
Ammonia	$NH_3 \leftrightarrow 1/2N_2 + 3/2H_2$	67 kJ/mol	400 - 500	
Methane/Water	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	-	500 - 1000	
Hydroxides	$Ca(OH_2) \leftrightarrow CaO + H_2O$	3000 kJ/m^3	500	
Calcium carbonate	$CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2$	4400 kJ/m ³	800 - 900	
Iron carbonate	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$	2600 kJ/m ³	180	
Metal hydrides	Metal $xH_2 \leftrightarrow Metal yH_2 + (x-y)H_2$	4000 kJ/m ³	200 - 300	
Metal oxides	2		2000 2500	
(Zn and Fe)	e.g. 2-step water splitting using Fe ₃ O ₄ /FeO redox system	-	2000 - 2500	
Alumninum ore alumina		-	2100 - 2300	
Methanolation-	CH OH () CO + 2H		200 250	
demethanolation	$CH_3OH \leftrightarrow CO + 2H_2$	-	200 - 250	
Magnesium oxide	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	3300 kJ/m ³	250 - 400	

Table 6. Chemical storage materials and reactions (Van, 2005)

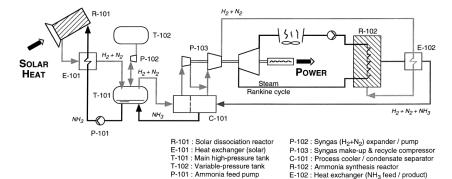


Fig. 6. Conceptional system design of a solar thermal power plant using an ammonia-based thermochemical closed-loop for energy conversion, storage and transport (Luzzi et al., 1999)

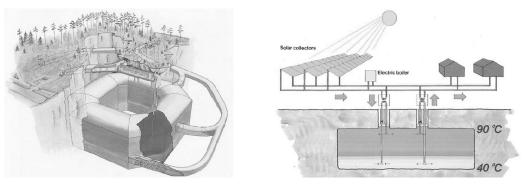


Fig. 7. Lyckebo rock cavern heat storage in Sweden (SKANSKA, 1983)

3. 지하공동을 활용한 열에너지 저장 현황

앞서 언급한 바와 같이, 지하공동을 활용한 열에너지 저장(cavern thermal energy storage, CTES) 사례는 국 내외적으로 많지 않은 실정이며 다양한 저장 매질의 적 용성과 효율성에 대한 연구가 진행 중에 있다. CTES의 대표적인 사례로는 열수저장을 목적으로 1981년과 1983년에 스웨덴 Avesta과 Lyckebo 지역에 건설된 저장 시스템이 있다. Avesta 지역의 CTES는 쓰레기 소각장의 여열을 저장하는 시스템으로 15,000 m³ 규모이며 시험 운영을 목적으로 단주기(1주일)로 운영된다. Lyckebo 시설(Fig. 7)의 경우, 태양열 에너지를 저장하는 시스템

으로 115,000 m³ 규모이며, 인근 주거지의 난방용으로 활용되고 있다.

특히, Lyckebo 시설은 세계 최초의 대규모 지하공동열에너지 저장 시설로 단주기·장주기로 운영되고 있으며, 온도 범위가 40-90℃인 열수 저장(액상 현열축열)을통해 5500 MWh의 전력을 생산하고 있다(Nordell et al., 2007). 이러한 시스템의 저장 원리는 저장소 내 유체의 온도구배를 적절히 제어하여 상하부 유체의 혼합효과를 방지하는 것이다. 열원으로부터 유입되는 고온의 유입수는 상부에, 저온의 저장수는 하부에 위치시키고 유량을 적절히 제어함으로써 온도차에 의한 열적 부력(thermal buoyancy)을 유도하여 안정된 상태를 유지하게 된다. 이를 열성층화(thermal stratification)라고하며, 이는 저장된 열에너지의 이용효율 측면에서 매우중요한 매개변수이다(Park et al., 2012).

4. 고온 열에너지 저장 현황

고온의 열에너지 저장 기술은 주로 태양열 발전설비에 활용되어 왔으며, 이미 1980년대부터 다양한 대규모 저장시설이 운용되고 있어 그 활용가능성이 입증된 상태이다. 실제로 태양열 발전설비에서 열에너지 저장 시스템을 활용하지 않는 경우 연간 가동율이 25% 미만에 그치는 데에 반해, 약 13시간 발전 분량의 축열을 통하여 가동율을 65% 수준으로 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 최근 적용이 시도된 용융금속염 액상축열 시스템은 전기를 저장하는 시스템의 1/17-1/27 수준의비용으로 에너지 저장이 가능하며, 기존의 오일 축열시스템과 비교하더라도 약 1/7의 비용만이 소요되는 것으로 분석된 바 있다(김진수와 강용혁, 2006).

태양열 발전시설의 열에너지 저장소로서는 보통 지상 탱크가 이용되는데, 한 개의 저장탱크에 열성층화가 유지되도록 저장하는 방식과 두 개의 저장탱크에 저온과고온의 저장매질을 따로 저장하는 방식이 있다. 지상탱크는 철, 알루미늄, 강화 콘크리트(reinforced concrete), 유리섬유(fiber glass) 등으로 제작되며, 단열재로서 글래스 울(glass wool), 미네랄 울(mineral wool), 폴리우레탄 등이 이용된다(Hasnain, 1998). 일반적으로 액상현열을 이용하는 경우가 대부분이며, 비교적 낮은 온도영역에서는 오일을, 상대적으로 높은 온도 영역에서는 용융염(molten salt)을 저장 매체로 사용하고 있다. 최근에는 콘크리트나 특수 세라믹을 이용한 고상 현열축열시스템에 대한 연구가 진행되어 왔으나 아직 실험 단계이다(Laing et al., 2006, Herrmann et al., 2006).

태양열에너지와 관련된 저장개념은 크게 active system

과 passive system으로 구분할 수 있다(Gil et al., 2010). Active system의 대표적인 특징은 강제 대류에 의한 저장 매질로의 열전달이라고 할 수 있으며 저장 매질 자체가 열교환기(heat exchanger)를 통해 순환하게 된다. 이때 열교환기는 태양열집열기(solar receiver)나 증기 발생기(steam generator)가 된다. Active system은 다시 direct system과 indirect system으로 분류되는데, 전자의 경우 열전달 유체(HTF)는 열저장 매질과 동일하며, 후자의 경우에는 별도의 열저장 매질을 사용한다. Passive system은 고상 현열축열 방식으로서 dual medium storage system이라고 불리우기도 한다. HTF는 열에너지의 저장(charging) 및 회수(discharging) 단계에서 저장 매질을 통과함으로써 열원과 열저장 매질, 그리고 열저장 매질과 열소비처 간에 열에너지를 전달하는 기능을 수행한다.

Table 7은 현재 대규모 태양열 발전시스템에서 사용되는 축열 시스템에 관한 정보를 나타낸 것이며, Fig. 8은 스페인 Solar Tres power plant의 발전 및 열에너지저장 시스템을 보여주는 것이다. Solar Tres plant는 두개의 지상탱크(Hot tank: 565 $^{\circ}$ C, Cold tank: 288 $^{\circ}$ C)를 사용하는 Active direct system으로 운영되고 있다.

5. 지하공동 열에너지 저장을 위한 저장 매질의 적용성

앞서 제2장에서 언급한 열에너지 저장방식 중 대용량 열에너지 저장에 대한 활용가능성이 입증된 방식은 현 열축열 방식이라고 할 수 있다. 잠열축열 방식은 냉난 방 및 급탕용, 온실 등 민생용으로 이용되고 있으나, 주 로 소규모 축열조를 대상으로 한 저온(120℃ 이하) 영 역에 국한되어 활용되고 있다(전명석, 2006). 보다 높은 온도 영역에서의 응용을 위한 잠열축열 기술은 아직 초 보적인 단계로서 대체로 태양열 발전에의 적용을 목적 으로 몇몇 금속염에 대한 실험적 연구 수준에 머물고 있다(Michels와 Hahne, 2007). 화학축열 방식은 이론 적으로 가장 진보적인 형태의 저장방식으로 알려져 있 고 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나, 현재까 지는 일부 대상계에 대한 실험적 연구가 이루어졌을 뿐 이다. 따라서 단시간 내 저장 매질의 상용화를 기대하 기는 어려운 실정이며, 현시점에서 지하공동 열에너지 저장 매질로 고려하는 것은 사실상 무리가 있다.

현열축열과 잠열축열 방식에 활용될 수 있는 여러 재료들이 지하공동 내 열에너지 저장 시 효과적인 저장 매체로 실용화되기 위해서는 기본적인 열역학적 데이터는 물론 저장(charging)과 회수(discharging) 단계의

Experiences/Project	Year	Storage concept	Storage medium	Heat transfer fluid	Operating temp. range ($^{\circ}$ C)	열용량 (MWht)	전력 (MWe)
LS3-SSPS-PSA, Spain	2004	Passive	High-temperature concrete vs. Catastable ceramics	Mineral Oil	n.a.	0.48	n.a.
ANDASOL I-SENER/Cobra, Guadix, Spain	2008	Active direct	Molten salts (NaNO ₃ + KNO ₃)	Steam	384 - 291	1010	n.a.
ANDASOL II-SENER/Cobra, Guadix, Spain	2009	Active indirect	Molten salts	Steam	n.a.	n.a.	n.a.
EXTRESOL I-SENER/Cobra	2011	Active indirect	Molten salts	Synthetic Oil	n.a.	n.a.	50
SEGS I, Dagget, CA, USA	1984-2001	Active direct	Mineral Oil (CALORIA)	Mineral Oil (CALORIA)	307 - n.a.	115	14
SEGS II, Dagget, CA, USA	1985	Active direct	Mineral Oil (ESSO 500)	Mineral Oil (ESSO 500)	316 - n.a.	-	30
SSPS DCS, PSA Spain	1981	Active direct	Mineral Oil (Santotherm 55)	Mineral Oil (Santotherm 55)	180 - 290	0.5	-
Solar One, Barstow, CA, USA	1982-1988	Active indirect	Mineral oil + sand + rocks	Steam	304 - 224	182	10
	1996-1999	Active direct	Molten salt	Molten salt	n.a.	105	10
Solar Two, Barstow, CA, USA	1995–1999	Active direct	Molten nitrate	Molten nitrate (KNO3 +NaNO3)	565 - 275	105	10
	1983	Active indirect	Molten salts	Steam	340 - 220	7	1.2
CESA I-PSA, Spain	1982	Active indirect	Molten salts (nitrate)	SteamSteam (100 bar)	n.a.	n.a.	1
			Molten salts	Molten salts	520 - n.a.	12	n.a.
CERS-SSPS PSA, Spain	1981	Active indirect	Molten salt (sodium)	Molten salts (liquid sodium)	n.a.	2.7	0.5
THEMIS, Targasonne, France	1982	Active direct	Molten salt	Molten salt	450 - 250	40	2.5
PS10-Abengoa, Sevilla, Spain	2007	Active direct	Steam-ceramic	Steam	n.a.	15	11
PS20-Abengoa, Sevilla, Spain	2007	Active direct	Steam-ceramic	Steam	n.a.	n.a.	20
SOLAR TRES-PSA, Spain (SENER)	2002-2007	Active direct	Molten salts	Molten salts	565 - 288	588	17

Table 7. Solar plower plants with storage systems existingg in the world (n.a. not available, Medrano et al., 2010)

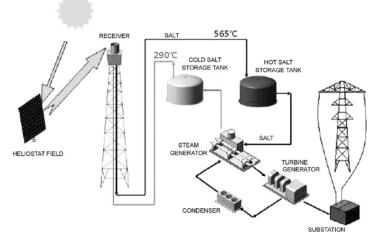


Fig. 8. Scheme of SOLAR Tres power plants (Planta Solar de Almeria, 2007)

반복 사이클에 따른 재료의 변질, 저장공동 벽면의 부식 문제 등 여러 가지 측면에서의 검토가 필요하다. 열에너지 저장 매체에 요구되는 일반적인 조건은 다음과 같다.

1) 단위부피 또는 단위 무게당 열용량이 커야 한다.

- 2) 비열이 커야 한다.
- 3) 열전도도가 커야 한다.
- 4) 독성과 인화성이 없어야 한다.
- 5) 사용 온도와 반복적인 운영 사이클에 대한 화학 적 안정성이 보장되어야 한다.
- 6) 터널 벽면에 대한 부식성이 없어야 한다.

Comparison items	Water (sensible)	Rock (sensible)	PCM (latent)
Operation Temperature Range	• Limited	• Large	Large Depending on the material
Specific Heat	• High	• Low	Medium
Thermal Conductivity properties	• Low • Convection effects improve the heat transfer	• Low	• Very low • Insulating
Thermal Storage Capacity per unit mass and volume for small temp. differences	• Low	• Low	• High
Stability to thermal cycling	• Good	• Good	Insufficient data
Availability	• Overall	Almost overall	Depending on the choice of material
Cost of material	Inexpensive	Inexpensive	Expensive
Required heat exchange geometry	• Simple	• Simple	Complex
Temp. gradients during charging and discharging	• Large	• Large	• Small
Thermal stratification with effect	• Existent • Works positively	• Existent • Works positively	Generally non-existent
Simultaneous charging appropriate discharging exchanger	Possible Not possible		Possible with selection of heat
Integration with solar heating/cooling systems	Direct integration with water systems	• Direct integration with water systems	Indirect integration
Cost of pumps, fans, etc.	• Low	• High	• Low
Corrosion with conventional materials of construction	Corrosion eliminated through corrosion inhibitors	Non-Corrosive	Presently only limited information available
Life	• Long	• Long	• Short
	i	i	

Table 8. Comparison of different storage techniques (Ataer, 2008)

- 7) 비용이 저렴하고 쉽게 구할 수 있어야 한다.
- 8) 증기압이 작아야 한다.
- 9) 상변화 온도가 일정하고, 상변화에 따른 부피 변화가 작아야 한다(잠열축열).
- 10) 상변화 온도가 시스템 운용 온도 범위 내에 있어 야 한다(잠열축열).
- 11) 결정화 속도가 크고 과냉각 현상이 작아야 한다 (잠열축열).
- 12) 상변화에 따른 부피변화가 작아야 한다(잠열축열).

Table 8은 액상현열축열과 고상현열축열의 대표적인 매체인 물과 암석, 그리고 잠열축열 매체인 PCM의 일 반적인 열역학적 특성, 비용, 시스템 운영상의 특징 등을 나열한 것으로, 이를 통해 각 저장 방식과 재료간의 정성적인 비교가 가능하다(Atear, 2008).

지하공동 열에너지 저장 시스템에 대한 저장 매질의

활용가능성은 저장소의 운영 온도에 따라 달라질 수 있다. Shin 등(1987)에 따르면, 열에너지의 온도에 따라 100℃ 이하는 주거용으로, 100-250℃ 범위는 주거용 및 산업용으로 사용되고 있으며, 250℃ 이상의 고온의 열에너지는 발전용으로 사용할 수 있다.

100℃ 이하의 열에너지를 저장하는 경우, 현열축열과 잠열축열 방식 모두 적용이 가능할 것으로 판단되나, 경제성과 운영 시스템의 간편성, 재료 수급의 용이성, 그리고 Lyckebo 사례를 통한 기술적 검증 등의 측면에 서 물을 이용한 액상 현열축열 방식이 가장 타당할 것 으로 사료된다.

한편, 100℃ 이상의 열에너지를 저장하는 경우에도 현열축열과 잠열축열 방식을 모두 고려해 볼 수 있다. 용융염을 이용한 액상축열 방식은 고온 열에너지 저장 에 적용할 수 있는 가장 효과적인 기술로 알려져 있으 며, 대규모 태양열 발전 시스템에서도 성공적으로 적용 되고 있다(Table 8). 그러나 저장소가 지상이 아닌 지하 공간에 위치하게 되므로, 새로운 운영 시스템의 개발이 필수적이다. 예를 들면, 지상의 경우 대류(convection) 에 의한 열전달이 지배적인 반면, 지하의 저장환경에서 는 전도(conduction)에 의한 열전달이 지배적이므로 상 이한 저장환경에 따른 단열시스템, 저장소의 위치나 규 모, 저장 효율 등에 대한 분석 및 설계가 이루어져야 할 것이다. 잠열축열 재료인 PCM의 경우, 소규모이기는 하나 건축 분야와 축열조 분야에서 이미 널리 상용화된 바 있고, 현열축열과 비교할 때 열저장, 제어 및 운전 효율 측면에서 큰 장점이 있는 축열 재료임이 분명하다. 그러나 고온 분야에서의 응용을 위한 잠열축열 기술은 아직 초보적인 단계로서 실험적 연구 수준에 머물고 있 고 저장 매질의 종류만도 수백종에 달한다. 따라서 현 시점에서 대규모 지하 열에너지 저장에 대한 특정 물질 의 활용성과 효율성을 평가하기는 어려운 실정이라고 할 수 있다.

6. 맺음말

본 논문에서는 열에너지 저장 매질과 저장 사례를 소 개하고, 지하공동 열에너지 저장 시스템을 위한 저장 매질의 조건 등을 살펴보았다. 여러 가지 저장 매질의 재료 특성과 기술개발 수준, 그리고 기존의 저장 사례 에 비추어 볼 때, 현재까지는 현열축열 방식만이 그 활 용가능성이 입증된 상태로 판단할 수 있었다. 지하공동 을 활용한 대규모 열에너지 저장은 전세계적으로 사례 가 많지 않고, 특히 고온 축열기술의 대부분은 지상 저 장탱크에 초점을 맞추어 논의되어 왔으므로 최적의 저 장 매질을 선택하는 데에는 아직 해결해야 할 많은 문 제들이 있다. 저장 매질의 선택과 운영 시스템의 설계 는 분리해서 고려할 수 있는 문제가 아니므로 지하공동 열에너지 저장 시스템의 개념 모델 정립을 위해서는 암 반공학적 요소 이외에도 재료공학, 기계공학, 화학공학, 수리학 등과 관련된 기술들이 종합적으로 검토되어야 하며, 이를 위해 관련 학제 간에 유기적인 관계를 갖고 연구개발이 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 '지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코 드 GP2012-001)'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1. 김진수, 강용혁, 2006, 고온 축열 기술개발동향. 태양에너 지, Vol. 5, No. 2, pp. 12-19.
- 2. 전명석, 2006, 상변화물질을 이용한 잠열축열 기술. 태양에 너지, Vol. 5, No. 1, pp. 12-29.
- Park, D., H. M. Kim, D. W. Ryu, B. H. Choi, C. Sunwoo, C. and K. C. Han, 2012, Technologies of underground thermal energy storage (UTES) and Swedish case for hot water. Tunnel and Underground Space, Vol. 22, No. 2, pp. 1-11.
- Shin, B. C., S. D. Kim, K. Y. Park and W. H. Park, 1987, Characteristics of high-temperature energy storage materials. Journal of the Korean solar energy society, Vol. 7, No. 1, pp. 61-74.
- Shim, B. O. and C. Lee, 2010, Status of underground thermal energy storage as shallow geothermal energy. Economic and Environmental Geology, Vol. 43, No. 2, pp. 197-205.
- Ataer, O.E., 2008, Storage of Thermal Energy. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Geyer, M. A., 1991, Thermal Storage for Solar Power Plants. In: Winter, C., Rizmann, R., Van-Hull, L. (eds.) Solar Power Plants, Springer-Verlag, New York.
- Gil, A., M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba and L. Cabeza, 2010, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 - Concepts, materials and modellization. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 1, pp. 31-55.
- Hasnain, S.M., 1998, Review on sustainable thermal energy storage technologies. Part 1: Heat storage materials and techniques, Energy Conversion and Management, Vol. 39, No. 11, pp. 1127-1138.
- Herrmann, U., M. Geyer and D. Kearney, 2006, Overview on thermal storage systems, Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants, FLABEG Solar International GmbH.
- Laing, D., W. D. Steinmann, R. Tamme and C. Richter, 2006, Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. Solar Energy, Vol. 80, No. 10, pp. 1283-1289.
- Lovegrove, K., A. Luzzi and H. Kreetz, 1999, A solardriven ammonia-based thermochemical energy storage system. Solar Energy, Vol. 67, No. 4, pp. 309-316.
- Medrano, M., A. Gil, I. Martorell, X. Potau and L. F. Cabeza, 2010, State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 - Case studies: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 2, pp. 56-72.
- Michels, H. and R. Pitz-Paal, 2007, Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. Solar Energy, Vol. 81, No. 6, pp. 829-837.
- Nordell, B., M. Grein, and M. Kharseh, 2007, Large-scale utilisation of renewable energy requires energy storage, Int. Conf. for Renewable Energies and Sustainable Development (ICRESD_07), Algeria.

- 16. Planta Solar de Almeria, 2007, Informe annual 2006.
- Sharma, A., V. Tyagi, C. Chen and D. Buddhi, 2009, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 2, pp. 318-345.
- SKANSKA, 1983, Swedish rock technique: Lyckebo seasonal energy storage plant, SKANSKA technical brochure.
- Steinmann, W. D. and R. Tamme, 2008, Latent heat storage for solar steam systems, Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 130, pp. 41-45.
- 20. Tamme, R., 2003, Concrete storage: update on the German

- concrete TES program, In: Proceedings of Workshop on thermal storage for trough power systems, Golden, Colorado, USA, pp. 20-21.
- Underground Energy, LLC. (http://www.undergroundenergy.com)
- Van Berkel, J., 2005, Storage of solar energy in chemical reactions. In: Jean-Christophe, H. (ed.) Thermal energy storage for solar and low energy buildings, Lleida, Spain.
- Zalba, B., J. M. Marín, L. F. Cabeza and H. Mehling, 2003, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Appl Therm Eng, Vol. 23, pp. 251-283.



박 정 욱

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경시 스템공학부 공학사

2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스 템공학부 공학석사

2011년 서울대학교 대학원 에너지시스템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3246 E-mail: jwpark@kigam.re.kr 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구 본부 Post-Doc.



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공 학과 공학박사

Tel: 042-868-3237 E-mail: bhchoi@kigam.re.kr 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구 본부 책임연구원



박 도 현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스 템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3913 E-mail: parkdo@kigam.re.kr 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구 본부 선임연구원



한 공 창

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1989년 Ecole des mines de Paris 지질공 학과 공학석사

1993년 Ecole des mines de Paris 지질공 학과 공학박사

Tel: 042-868-3241

E-mail: hankc@kigam.re.kr 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구

본부 책임연구원