지하 열에너지 저장 기술 및 스웨덴 암반공동내 열수 저장 사례

박도현¹⁾, 김형목¹⁾, 류동우^{1)*}, 최병희¹⁾, 선우춘²⁾, 한공창²⁾

Technologies of Underground Thermal Energy Storage (UTES) and Swedish Case for Hot Water

Dohyun Park, Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu, Byung-Hee Choi,
Choon Sunwoo, Kong-Chang Han

Abstract Thermal energy storage is defined as the temporary storage of thermal energy at high or low temperatures for later use in need. The energy storage can reduce the time or rate mismatch between energy supply and demand, and thus it plays an important role in conserving energy and improving the efficiency of energy utilization, especially for renewable energy sources which provide energy intermittently. Underground thermal energy storage (UTES) can have additional advantages in energy efficiency thanks to low thermal conductivity and high heat capacity of surrounding rock mass. In this paper, we introduced the technologies of underground thermal energy storage and rock caverns for hot water storage in Sweden.

Key words Underground thermal energy storage, Cavern thermal energy storage, Energy utilization efficiency

초 록 열에너지 저장은 고온 또는 저온의 열에너지를 임시 저장하는 것으로서 에너지 수요와 공급 사이의 불균형을 줄일 수 있고, 이를 통해 에너지를 절약하고 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다. 특히 간헐적으로 에너지를 생산하는 신재생에너지의 경우 에너지 저장 장치와의 조합은 필수적이다. 또한 지하 암반의 낮은 열전도도와 높은 열용량을 이용하여 지하에 열에너지를 저장하는 경우 열손실을 최소화하여 추가적인 효율 향상이 기대된다. 본 고에서는 지하 열에너지 저장 기술을 조사 분석하고 스웨덴에 암반공동내 열에너지 저장 사례를 소개하였다.

핵심어 지하 열에너지 저장, 암반공동 열에너지 저장, 에너지 이용효율

1. 서 론

열에너지 저장은 고온 또는 저온의 에너지(태양열 에너지, 심야 잉여전력, 산업폐열 등)를 특정 공간에 장단 기적으로 저장하는 것이다. 열에너지 저장 장치는 에너지의 수요와 공급의 시간적 및 양적 차이를 보완하는 기능을 수행하며, 이를 통해 에너지를 절약하고 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다. 특히 에너지 발생이 기후나 계절, 시간대에 따라 일정하지 않고 에너지 수요

시간대와도 일치하지 않은 신재생에너지의 경우 에너지 저장을 통해 그 이용효율을 높일 수 있다.

지하 열에너지 저장(UTES, underground thermal energy storage)은 암반의 낮은 열전도 특성을 활용하여 지하 공간에 열에너지를 저장하는 개념으로서 저장되는 열 에너지는 온도에 따라 소규모 주거용 에너지 또는 대규모 전력발전용 에너지로 활용가능하다. 즉 100℃ 이하의 열에너지는 주거용으로 사용가능하며, 100-250℃ 범위의 열에너지는 주거용 및 산업용, 250℃ 이상의 열 에너지는 발전용으로 사용가능하다(신병철 외, 1987). UTES는 대수층 열에너지 저장(ATES, aquifer thermal energy storage), 보어홀 열에너지 저장(BTES, borehole thermal energy storage), 암반공동 열에너지 저장(CTES, cavern thermal energy storage)으로 크게 분류된다(심병완과 이철우, 2010). 또한 UTES는 운영 형태에 따라

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2012년 1월 25일

심사 완료일 : 2012년 2월 6일

게재 확정일 : 2012년 2월 21일

외부의 물질이나 에너지의 출입을 허용하지 않는 폐쇄형 시스템(closed system)과 에너지 또는 물질을 교환하는 개방형 시스템(open system)으로 구분할 수 있다. ATES는 열에너지를 대수층에 주입하여 대수층의 지하수와와의 직접 열교환이 발생하므로 개방형 시스템에 해당하고, BTES는 보어홀내 열교환기를 통해 열에너지를 저장 및 회수하므로 폐쇄형 시스템에 해당된다. CTES는 규모 및 용도에 따라 두 가지 모두 활용가능하다.

열에너지를 저장하는 방법 중 현열(sensible heat)을 이용하는 방법은 열효율이 65-75%이고, 잠열(latent heat)을 이용하는 방법은 85-95%인 것으로 알려져 있다(신병철 외, 1987). 저장물질은 물 또는 암석과 같은 현열재료와 파라인 계통의 잠열재료가 사용될 수 있다. 특히 250℃ 이상의 열에너지 저장을 위해서는 100-850℃에서 열에너지를 저장하고 회수할 수 있는 상변화물질(PCM, phase change material)을 이용하는 것이 효과적이다(신병철 외, 1987).

본 고에서는 지하에 열에너지를 저장하는 원리와 방법, 해결해야 할 문제점 등에 대해서 기술하였고, 스웨덴 Lyckebo 지역에 대규모 암반공동내 열에너지 저장 사례를 소개하였다.

2. 지하 열에너지 저장

2.1 열에너지 저장 방법

열에너지 저장 방법은 저장하는 열에너지의 형태에 따라 현열축열(sensible heat storage), 잠열축열(latent heat storage), 화학축열(chemical heat storage)로 구분할 수 있으며 다음과 같은 특징이 있다.

현열축열은 Fig. 1에서와 같이 저장물질의 온도차에 따른 비열(specific heat)에 의해 열에너지를 저장하는 방

법으로 저장물질은 저장온도 조건에서 상변화가 없어야 하고 화학적으로 안정성을 유지해야 한다. 현열축열에 가장 일반적으로 사용되는 물질은 물로서 냉수나 온수를 저장했다가 필요시 회수하여 사용하는 것이 현열축열의 한 가지 예이다. 현열축열의 경우 단위부피당 열을 저장할 수 있는 양이 적어 큰 용량의 저장시스템이 필요하며, 열손실을 고려해야 하므로 사용온도 이상의 고온 또는 그 이하의 저온으로 저장해야 하는 단점이 있다. 또한 저장시스템 내부에 열성층화(thermal stratification)가 원활히 이루어지지 않을 경우 열에너지 이용효율이 가변적이라는 문제점이 있다. 현열축열에서 열에너지는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (1)$$

여기서 Q 는 열에너지(kJ), m 은 물질의 질량(kg), C_p 는 비열(kJ/(kg·℃)), T_1 과 T_2 는 각각 낮은 온도와 높은 온도(℃)를 나타낸다.

잠열축열은 물질의 상변화에 수반되는 에너지를 저장에 활용하는 방법으로서 비열 및 온도차를 이용하는 현열축열에 비해 비교적 작은 온도차로 많은 열에너지를 저장할 수 있는 장점이 있다. 즉 잠열축열은 물질의 상변화시 잠열을 이용하므로 상변화 과정에서 주위와 높은 열교환이 일어나면서도 Fig. 1과 같이 온도변화가 없기 때문에 단위부피당 에너지 저장량이 큰 특징이 있다. 잠열축열에 사용되는 물질은 상변화물질로 정의되며, 기체-액체 상변화, 고체-액체 상변화를 고려할 수 있다. 그러나 기체-액체 상변화의 경우 부피변화가 고체-액체 상변화에 비해 크므로 일반적으로 상변화물질은 고체-액체 상변화를 이용한 물질이 대부분이고, 상변화시 발생하는 부피변화에 대응할 수 있는 저장시스템이 필요한 단점이 있다. 신병철 외(1987)에 따르면, 축열 특성 및 화학적 안정성 등을 고려할 때 상변화물질로서 용융염(molten salt)이 가장 적합한 물질이라고 할 수 있으며, 실용화를 위해서는 장기 운영으로 인한 저장매체의 변질, 저장공간의 부식문제가 해결되어야 한다. 또한 열에너지 회수 과정에서 열전달 표면에 생긴 고체는 열전달을 크게 방해하므로 열을 효과적으로 방열시킬 수 있는 기술도 개발되어야 한다. 잠열에너지는 식 (2)와 같이 계산되며, 상변화물질을 이용하는 경우 일반적으로 Fig. 2와 같이 용융점(melting point) 전후에서 열에너지 저장 및 회수가 이루어지므로 식 (3)과 같이 열에너지가 계산된다.

$$Q = m \lambda \quad (2)$$

Fig. 1. Sensible heat vs. latent heat (T_{PC} = temperature of phase change)

Fig. 2. Temperature control during phase change for energy storage (T_{PC} = temperature of phase change)

Fig. 3. Energy densities of physical and chemical change properties (Kato, 2005)

$$Q = m \left(\int_{T_1}^{T_{PC}} C_{ps} dT + \lambda + \int_{T_{PC}}^{T_2} C_{pl} dT \right) \quad (3)$$

여기서 Q 는 열에너지(kJ), m 은 물질의 질량(kg), λ 는 specific latent heat(kJ/kg), C_{ps} 와 C_{pl} 은 각각 고체와 액체 상태에서의 비열(kJ/(kg·°C)), T_1 과 T_2 는 각각 낮은 온도(°C)와 높은 온도(°C), T_{PC} 는 용융점(°C)을 나타낸다.

화학축열은 물질의 가역 화학반응(reversible chemical reaction)을 이용하여 열에너지를 화학에너지 형태로 저장한 후, 역반응을 통해 다시 화학에너지를 열에너지로 변환시키는 방법이다. 화학축열은 현열축열과 잠열축열에 비해 에너지 저장 밀도가 가장 큰 장점이 있으나(Fig. 3), 장기적으로 지속적인 물질의 가역반응이 보장되어야 하는 단점이 있다. Fig. 3은 현열축열, 잠열축열, 화학축열의 에너지 밀도를 나타낸다(Kato, 2005).

2.2 지하 열에너지 저장 방식 및 사례

앞서 언급한 대로 UTES는 ATES, BTES, CTES로 분류할 수 있다. ATES는 열에너지를 대수층내 지하수 또는 광물에 저장하며, 열에너지 주입 및 회수를 위해 보어홀을 천공한다. Fig. 4(a)와 같이 계절별로 주입공과 회수공의 역할을 변환하여 열에너지를 효과적으로 이용할 수 있으며, 단기 및 장기저장이 가능하다. BTES는 현재 가장 많이 활용되는 저장방식으로 Fig. 4(b)와 같이 열순환을 위해 다수의 보어홀을 천공한다. BTES는 보어홀내 열교환기를 통해 열에너지를 저장 및 회수하는 폐쇄형 시스템으로 ATES와 같이 장주기로 활용 가능하나, ATES에 비해 열에너지 저장용량이 작은 편이다. CTES는 암반의 낮은 열전도율과 높은 기밀성을 이용하는 암반굴착형 저장방식으로 규모와 용도에 따라 개방형과 폐쇄형 시스템 모두 활용가능하다(Fig. 4(c)). CTES는 건설비용이 다른 저장 방식에 비해 고가이지만, 대용량 저장 및 에너지 출력을 크게 할 수 있는 장점이 있다.

Table 1은 UTES를 위한 전세계 실험용 또는 실증용 플랜트 건설현황(1976-1992년)을 나타낸다(Sanner & Knoblich, 1998). 열에너지 저장 관련 최초 실험은 미국 Alabama의 Auburn 대학에서 수행되었고, 깊이 40-62 m의 피압대수층(confined aquifer)에 온수를 두 단계에 걸쳐 주입하였다(Molz 외, 1979). 1 단계에서는 37°C의 물(부피 7,570 m³)을 36.6일 동안 저장하여 67%의 열에너지 회수율을 보였고, 2 단계에서는 55°C의 물(부피 54,800 m³)을 79일 동안 저장하여 65%의 열에너지 회수율을 기록하였다. 이 실험에서 발견한 기술적 문제점은 주입정 주변의 클로깅(clogging) 현상이었으며, 이는 열에너지 주입시 점토광물의 팽창을 유발하는 담수(freshwater)를 사용하여 발생한 것으로 밝혀졌다. 1987년 저장온도 180°C에 대한 실험은 프랑스 Thiverval-Grignon 지역에 지하 500 m 대수층을 대상으로 수행되었으나 실험은 성공적이지 못하였다. 열에너지 회수를 위한 펌프가 제대로 작동하지 않았고, 저장된 고압의 에너지를 제어하지 못하여 열에너지 회수가 전혀 안된 것으로 보고되었다. 이와 같이 100°C 이상의 열에너지 저장은 기계적, 지반공학적, 수리화학적 등의 기술 문제를 유발할 수 있다(Sanner & Knoblich, 1998). 한편 스웨덴 Luleå 지역에 BTES는 수년간 운영되었으며, 네덜란드 Utrecht 지역에 ATES는 현재까지 성공적으로 운영중에 있다. 또한 스웨덴 Avesta 지역에 CTES는 저장온도 115°C, 저장용량 15,000 m³로서 1982년 이후로 현재까지 운영중에 있으며, 세계 최초 대규모 열에너지 저장 암반공동인 Lyckebo 지역의 CTES는 태양열에너

Fig. 4. Types of UTES (Nordell, 2000)

지와 결합된 CSHPPS(central solar heating plants with seasonal storage)로서 저장온도 75℃, 저장용량 100,000 m³이며, 1983년 이후로 현재까지 운영중에 있다.

한편 UTES를 통해 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있지만 환경적인 측면에서의 문제점도 고려해야 한다. 즉 열에너지 저장 및 회수를 위한 보어홀을 통해 지상의 오염물질이 지하수에 유입되어 오염을 유발할 수 있고, 저장공간내 저장매질 및 열에너지가 누출될 경우 지하수 오염 및 환경변화가 발생할 수 있다. 또한 40℃ 이상의 열에너지가 지하에 저장되는 경우 화학종 형성(chemical speciation), 미생물학적 변화(microbiological change) 등과 같은 환경변화가 발생할

수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다(ECES, 1997).

2.3 열수(hot water) 저장 기술

물과 같은 액체를 열에너지로 저장하는 원리는 고온의 유입수와 저온의 저장수와의 혼합 효과를 열적 부력(thermal buoyancy)을 이용하여 적절히 감소시켜 열성층화를 유지하는 것이며, 유체의 열성층화는 저장된 열에너지의 이용효율 측면에서 중요한 매개변수이다. 저장소내 열성층화는 물의 온도변화에 따른 밀도 차이로 인하여 온도가 높은 물이 상부에 위치하고, 하부에는 온도가 낮은 물이 위치함으로써 저장소내 유체가 안정된 상태를 유지하는 것을 의미한다. 열성층화 상태에서는

Table 1. UTES experimental and pilot plants (Sanner & Knoblich, 1998)

Year	Name/Location	Max. Temp.	Remarks	Reference
1976	Auburn University, Mobile AL, USA	55℃	ATES, experiment, closed	Molz 외(1979)
1982	SPEOS, Lausanne-Dorigny, Switzerland	69℃	Waste water treatment plant, ATES, closed	Saugy 외(1988)
1982	Hørsholm, Denmark	100℃	Waste incineration, ATES	Schleisner Ibsen 외(1991)
1982	University of Minnesota, St. Paul, USA	115℃	ATES, experiment, aquifer at 180-240 m depth, closed	Walton(1986)
1982	District Heating, Avesta, Sweden	115℃	Rock cavern 15,000 m ³ , short-term storage (3 days), in operation	Hellström(1997; recited from Sanner & Knoblich(1998))
1983	Highway Maintenance Facility, Vaulruz, Switzerland	53℃	Solar heat, horizontal tubes in soil, 3,300 m ³ ground volume	Dalenbäck(1990)
1983	Luleå Tehcn. Univ., Luleå, Swden	65℃	Industrial waste heat, 121 boreholes, closed	Nordell(1990)
1983	CSHPSS, Lyckebo, Sweden	75℃	Solar heat, rock cavern, 100,000 m ³ , in operation	Dalenbäck(1990)
1984	CSHPSS, Groningen, Netherlands	50℃	Solar heat, 360 borehole heat exchangers, in operation	Wijsman(1988)
1986	Rümland, Switzerland	43℃	Experiment, 7 borehole heat exchangers, closed	EWI(1987)
1987	Plaisir, Thiverval-Grignon, France	180℃	ATES, experiment, aquifer at 500 m depth, closed	Pfiffer 외(1991)
1988	Öxelösund, Sweden	95℃	Rock cavern, 200,000 m ³ , converted oil storage, closed	Hellström(1997; recited from Sanner & Knoblich(1998))
1991	De Uithof, Utrecht University, Utrecht, Netherlands	90℃	Waste heat from and power co-generation, ATES, in operation	Van Loon & Paul(1991)
1992	SGL, Linköping, Sweden	70℃	Experiments, vertical pipes in clay, closed	Gabrielsson 외(1997)

CSHPSS = central solar heating plants with seasonal storage

온도가 낮은 무거운 유체가 아래에 있고 온도가 높은 가벼운 유체가 위에 있기 때문에 열의 대류(convection) 현상은 발생하지 않으며, 수직 방향으로 온도 변화가 있는 온도경계층(thermocline)에서 열전도 현상만 발생한다(한국에너지기술연구원, 2008).

저장소내 열성층화에 영향을 미치는 인자로는 유체 주입구의 형상, 유체 주입 속도, 저장소 형상의 종횡비(aspect ratio) 및 저장소 재질, 저장소로부터 외부로의 열손실 등이 있다. 저장소의 설계에 있어서 가장 우선적으로 결정되어야 하는 것은 저장소의 용량으로서 저장소의 높이와 지름(폭) 등의 규격을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 일반적으로 저장소의 종횡비(높이/폭)가 커질수록 열성층화가 높게 유지되는 것으로 알려져 있다(주홍진 외, 2008). Cole & Bellinger(1992), Ismail

외(1997), Hahne & Chen(1998)은 종횡비가 4일 때 열성층화가 최대로 발생한다고 하였고, Nelson 외(1999)에 따르면 종횡비가 3일 때 최적이고, Hariharan 외(1991)는 종횡비가 3-4의 범위에 있을 때 최적이라고 보고하였다. 한편 Cotter & Charles(1993), Matrawy 외(1996), Ismail 외(1997), Eames & Norton(1998), Bouhdjar & Harhad(2002)는 종횡비가 3 이하인 경우에 열성층화가 종횡비의 변화에 민감하다고 하였다. 주홍진 외(2008)의 경우 수치해석적 연구를 통해 태양열에 의한 고온수 저장시 저장소의 종횡비를 2 이상으로 설계하는 것이 열성층화에 있어 유리하다고 제안하였다.

도심지 등 지상에서는 설치 공간이 제한적이므로 종횡비가 큰 대규모의 저장소를 건설하는 것이 용이하지 않다. 그러나 지하에 저장소를 설치하는 경우 공간 활

용에 있어 유연하므로 저장할 열에너지의 온도 범위, 주변 암반의 열전도 특성 등을 고려한 상세 분석을 통해 최적의 열성층화가 발생하는 중형비를 적용할 수 있는 장점이 있다. 스웨덴의 Lyckebo 암반공동 시설의 저장 공간은 높이 31 m, 폭 18 m로 중형비 약 1.7로 건설되었다.

3. 스웨덴 암반공동내 열에너지 저장 사례

3.1 암반공동내 열에너지 저장시설

스웨덴에서는 열수 저장을 위해 Avesta와 Lyckebo 지역에 지하 암반공동 저장시설을 건설하여 운영중에 있다(Fig. 5). Avesta 시설은 저장규모 15,000 m³의 암반공동으로 1981년에 건설되었으며, 운영주기는 단주기(1주일 이내)로 현재도 운영중에 있으며 주로 시험운영을 목적으로 하고 있다. 읍살라 북쪽에 위치한 Lyckebo 시설은 세계 최초의 대규모 암반공동 열에너지 저장시설로서 저장규모 100,000 m³로 1983년에 건설되었고, 주거지 난방을 목적으로 열에너지를 저장하고 있다.

3.2 Lyckebo 열에너지 저장시설

3.2.1 시설 개요

스웨덴 읍살라 북쪽에 위치한 Lyckebo 저장시설은

Lyckebo 지역 주변의 550가구에 대한 난방을 위해 건설되었다. 면적 4,300 m²의 태양열 집열기(solar collector)가 설치되었고, 3천 9백만 SEK(저장공동 건설 비용 = 1천 7백만 SEK)의 건설비가 투입되었다. 공사는 터키 방식으로 이루어졌고 스웨덴의 SKANSKA가 시공하였다(SKANSKA, 1983a, 1983b).

암반공동에 저장되는 100,000 m³의 물은 5,500 MWh의 열용량을 갖고 있으며, 저장된 물은 열성층화로 인해 온도층을 이루며 저장되어 있다. 즉 저장공동 바닥부의 온도 40℃ 부터 천정부의 온도 90℃ 까지 연속적으로 층을 이루며 물이 저장되어 있다(Fig. 6). 물의 저장 및 생산은 수요에 맞춰 이루어진다. 예를 들어, 여름에는 60℃ 온도층에서 물을 생산하고, 겨울에는 이보다 높은 75℃ 온도층에서 물을 생산한다. 봄에는 대부분의 온도층에서 물을 생산하므로 물의 온도는 대부분 40℃를 유지한다. 태양열에너지로만 저장공동의 물 온도를 유지하려면 30,000 m² 규모의 태양열 집열기가 필요하며, 초기에는 필요한 태양열 집열기 면적의 15%만 설치하였고, 나머지 85%의 열은 전기보일러에 의해 공급되었다. Fig. 7은 Lyckebo 저장시설의 열에너지 운영을 위한 연간 계획을 나타낸다.

주변 암반으로의 열 손실은 초기 운영시(5년 이내) 200 kW 이상이나 5년 이후에는 점차적으로 감소하여 열 손실 정도가 175 kW로 유지된다. 이는 20-30일 동

Fig. 5. Cavern thermal energy storages in Sweden

Fig. 6. Conceptual diagram of the thermal energy storage (SKANSKA, 1983b)

Fig. 7. Annual plan on the thermal energy storage with seasonal variations (SKANSKA, 1983b)

안 평균 1°C 온도에 상응하는 열 손실이다(Fig. 8). 한편 Lyckebo 저장시설은 초기에는 열에너지 저장 온도를 $40\text{--}90^{\circ}\text{C}$ 로 계획하였으나, 2011년 현재는 열에너지 저장 온도를 $47\text{--}95^{\circ}\text{C}$ 로 변경하였다. 또한 초기에는 태양열에너지를 열공급원으로 계획하였으나, 현재는 바이오 연료로부터 열에너지를 공급받는 것으로 변경하였고, 운영주기도 1 회/년에서 2 회/년으로 변경하여 타당성을 평가하고 있다(Karlsson, 2011).

3.2.2 지질 및 지반 조건

Pilebro(2011)에 따르면, Lyckebo 저장시설 주변의 암석은 양호한 암질의 화강암 및 편마암으로 균열이 거의 없는 상태이고, 암석내 균열은 이차 광물(secondary

Fig. 8. Energy losses from the storage cavern (SKANSKA, 1983b)

mineral)로 채워져 있다. 암석은 열전도도 $3.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 비열 $2,160 \text{ kJ}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$, 밀도 $2.7 \text{ t}/\text{m}^3$ 이었다. COWI(2004)에 의하면 암석과 토사의 전형적인 열전도도는 Table 2와 같다. 표로부터 Lyckebo 시설의 암석은 편마암의 일반적인 열전도 특성을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 지하

Table 2. Typical values of thermal conductivity (COWI, 2004)

Type	Thermal conductivity (W/(m·°C))	Type	Thermal conductivity (W/(m·°C))
Quartzite	4.0-6.0	Limestone	2.5-3.0
Light granite	3.5-4.0	Sandstone	2.5-4.0
Light Gneiss	3.0-3.5	Shale	2.0-3.0
Dark granite	2.5-3.0	Soil	2.0-2.5

수 흐름을 분석하기 위해 시추공 조사를 수행하였고, 저장공동 주변에 지하수 흐름속도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 열에너지 주입전 초기 암반의 온도는 6-8°C 이었다.

3.2.3 저장시설 구조 및 설비

Lyckebo 열에너지 저장시설은 Fig. 9와 같이 토러스 (torus) 형태의 구조로서 내부 직경 35 m, 외부 직경 75 m이며, 지하 30 m에 저장시설 천단부가 위치하고 있다. 저장공동의 단면 폭은 18 m, 높이는 31 m로서 저장소의 종횡비는 약 1.7이다. 시공사는 스웨덴의 SKANSKA이었고 현재 스웨덴 전력 회사인 VATTENFALL이 소유하고 있다.

암반공동의 굴착은 3분 천공장비를 이용한 재래식 발파공법으로 이루어졌으며, top heading method에 의해 분할 굴착되었다. 분할 굴착 단면은 top heading이 이루어진 7 m 높이의 상부 단면, 8 m 높이의 3개 벤치단면

으로 구성되었고, 두 개의 막장에서 동시 굴착을 수행하였으며 암반은 록볼트와 숏크리트로 보강되었다. 굴착 총 기간은 7개월이었고 저장공동의 굴착은 4개월이 소요되었다. Fig. 10과 같이 물 순환(주입/생산)을 위한

Fig. 9. Layout of the Lyckebo rock cavern storage in Sweden (SKANSKA, 1983b)

Shafts and access tunnels

Fig. 10. Shafts for hot water storage, and access and service tunnels (SKANSKA, 1983a, 1983b)

Fig. 11. Electric boiler (left), and control room and heat exchanger (right) installed inside the service tunnel (SKANSKA, 1983b)

두 개의 수직구가 상향식으로 굴착되었고, 저장공동과 서비스 터널(service tunnel or distribution center)을 연결하고 있다. 수직구는 직경 1 m이고 상향식으로 전단면 굴착되었다. 저장공동 굴착을 위한 진입 터널(access tunnel)은 Fig. 10과 같이 저장공동 상부, 중간, 바닥부에 각 1개씩 굴착되었다.

서비스 터널은 Fig. 10과 같이 저장공동 상부에 위치하고 있고, 서비스 터널 내부에는 열에너지를 지하에 저장하기 위한 열교환기, 6 MW급 전기보일러, 관제실이 갖추어져 있다(Fig. 11). 운영 초기에는 필요한 태양열 집열기 면적의 15%만 설치하였고, 나머지 85% 열은 6 MW급 전기보일러에 의해 공급하는 것으로 계획되었다. 서비스 터널내 모든 설비는 컴퓨터에 의해 제어되며, 특정 온도의 물을 저장공동내 원하는 온도층에 저장하고 필요시 원하는 온도층의 물을 회수하기 위한 제어설비가 갖추어져 있다.

4. 맺음말

본 고에서는 열에너지를 지하에 저장하기 위한 기술과 스웨덴의 대규모 암반공동 저장 사례를 소개하였다. 기존의 지하 열에너지 저장 사례로부터 100℃ 이하의 열에너지 저장은 기술적으로 큰 문제가 없으나, 100℃ 이상의 열에너지를 저장하기 위해서는 저장재료, 기계,

지반공학, 수리화학 등과 관련된 문제점들이 해결되어야 하는 것을 알 수 있었다.

100℃ 이상의 고온 열에너지를 저장하기 위해서는 용융염과 같은 상변화물질을 사용해야 하므로 상변화 재료의 열역학적 특성, 장기 저장으로 인한 재료 변질 및 저장공간의 부식 특성, 열에너지 회수를 위한 방열 기술 등에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 열에너지 이용효율은 저장공간내 열성층화 정도와 직접적인 관련이 있기 때문에 최적 열성층화를 위한 지하 저장공간의 형상 및 배치에 대한 연구가 필요하며, 저장된 열에너지의 손실을 최소화하기 위해서는 주변 지하수 유동과 연계한 저장 효율 분석이 필요할 것이다. 환경적인 측면에서는 고온의 열에너지 저장시 지하수 오염과 함께 열전달에 의한 지상 및 지하에 화학적, 미생물학적, 생태학적 환경변화 등이 발생할 수 있으므로 열에너지 저장공간 주변의 환경변화에 대한 예측, 모니터링, 위험 대응 기술이 개발되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 ‘지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP2012-001)’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bouhdjar A. and A. Harhad, 2002, Numerical analysis of transient mixed convection flow in storage tank: influence of fluid properties and aspect ratios on stratification, *Renewable Energy* 25, 555-567.
- Cole R. L. and F. O. Bellinger, 1982, Thermally stratified tanks, *ASHRAE Transactions* 88, 1005-1017.
- Cotter M. A. and M. E. Charles, 1993, Transient cooling of petroleum by natural convection in cylindrical storage tanks-II. Effect of heat transfer coefficient, aspect ratio, and temperature-dependent viscosity, *Int J Heat and Mass Transfer* 36, 2175-2182.
- COWI, 2004, Pre-design guide for ground source cooling systems with thermal energy storage, Nordic Energy Research report P-57725-A-1 ADM 02.
- Dalenäck J. O., 1990, Central solar heating plants with seasonal storage, Status report SCBR D14:1990, 1-105.
- Eames P. C. and B. Norton, 1998, The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low Reynolds number flows, *Int J Heat and Mass Transfer* 41, 2131-2142.
- ECES, 1997, Underground thermal energy storage: procedures for environmental impact assessment, Working report.
- EWI, 1987, Speicherung von Wärme niedriger temperatur in Bohrlöchern, NEFF-Projekt 105.1, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Zürich, pp. 89.
- Gabriesson A., M. Lehtmetts, L. Moritz and U. Bergdahl, 1997, Heat storage in soft clay, field tests with heating (70°C) and freezing of the soil, SGI report 53, 1-128.
- Hahne E. and Y. Chen, 1998, Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores, *Solar Energy* 64, 9-18.
- Hariharan K., K. Badrinarayana, S. S. Murthy and M. V. Murthy, 1991, Temperature stratification in hot-water storage tanks, *Energy* 16, 977-982.
- IEA (International Energy Agency), 2008, ANNEX VIII-Improved cogeneration and heat utilization in DH networks, IEA report 8DHC-08-02.
- Ismail K. A. R., J. F. B. Leal and M. A. Zanardi, 1997, Models of liquid storage tanks, *Int J Energy Research* 22, 805-815.
- Karlsson A., 2011, Personal communication.
- Kato Y., 2005, Chemical heat storage technologies for thermal energy transportation, Workshop of Annex 18-Transportation of energy by utilization of thermal energy storage technology, Bad Tölz, Germany.
- Matrawy K. K., I. Farkas and J. Buzás, 1996, Optimum selection of the aspect ratio of solar tank, *Proceedings of EuroSun'96*, Freiberg, Germany, 251-255.
- Molz F. J., A. D. Parr, P. F. Andersen, V. D. Lucido and J. C. Warman, 1979, Thermal energy storage in a confined aquifer: experimental results, *Water Resources Research* 15.6, 1509-1514.
- Nelson J. E. B., A. R. Balakrishnan and S. S. Murthy, 1999, Parametric study on thermally stratified chilled water storage systems, *Applied Thermal Engineering* 19, 89-115.
- Nordell B., 1990, A borehole heat store in rock at the University of Luleå, Status report SCBR D12:1990, 1-56.
- Nordell B., 2000, Large-scale thermal energy storage, *Proceedings of Winter Cities 2000*, Luleå, Sweden, 1-10.
- Pilebro H., 2011, Personal communication.
- Pfiffer M., M. Durin, J. Despois and B. Fritz, 1991, The heat storage project at Plaisir-Thiverval-Grignon, conclusions after three years of field experiments, *Proceedings of the fifth international conference on energy storage (Thermastock 91)*, Utrecht, Netherlands, 1.16.1-1.16.6.
- Sanner B. and K. Knoblich, 1998, New IEA-Activity ECES ANNEX 12 High temperature underground thermal energy storage, *Proceedings of the second Stockton international geothermal conference*, New Jersey, USA, pp. 1.1-1.9 of International section.
- Saugy B., J. J. Miserez and B. Matthey, 1988, Stocakge saisonnier de chaleur dans l'aquifère, stocakge pilote d'énergie par ouvrage souterrain (SPEOS), Résultats de 5 ans de fonctionnement, *Proceedings of the fourth conference on energy storage (Jigastock 88)*, Paris, France, 325-326.
- Schleisner Ibsen L., B. Qvale and C. Boesen, 1991, Windup of the Danish aquifer thermal energy storage plant, answers gained and questions remaining, *Proceedings of the fifth international conference on energy storage (Thermastock 91)*, Utrecht, Netherlands, 1.7.1-1.7.6.
- SKANSKA, 1983a, New ways to solve the energy problem: Building underground, *World Construction*, 21-22.
- SKANSKA, 1983b, Swedish rock technique: Lyckebo seasonal energy storage plant, SKANSKA technical brochure.
- Van Loon L.J.M and A. Paul, 1991, Aquifer thermal energy storage at the State University of Utrecht, *Proceedings of the fifth international conference on energy storage (Thermastock 91)*, Utrecht, Netherlands, 1.3.1-1.3.7.
- Walton M., 1986, University of Minnesota aquifer heat storage project, *STES-Newsletter VIII.3*, 1-7.
- Wijsman A. J. T. M., 1988, Monitoring results of the Groningen CSHPSS, *Proceedings of the fourth international conference on energy storage (Jigastock 88)*, Paris, France, 543-547.
- 신병철, 김상돈, 박건유, 박원훈, 1987, 고온 축열재료의 특성, *한국태양에너지학회지* 7.1, 61-74.
- 심병완, 이철우, 2010, 천부 지열에너지로서의 지하 열에너지 저장 기술 동향, *대한자원환경지질학회지* 43.2, 197-205.
- 주흥진, 김정배, 광희열, 2008, 태양열 축열조의 종횡비에 따른 열성충화 수치해석 연구, *한국태양에너지학회 추계학술발표회 논문집*, 178-183.
- 한국에너지기술연구원, 2008, 태양열설비 시스템 표준화, 지식경제부 연구보고서.

박도현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3913

E-mail: parkdo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

류동우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099

E-mail: dwryu@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

선우쑤

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1985년 Paris VI 대학(France) DEA
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과(France) 공학박사

Tel: 042-868-3235

E-mail: sunwoo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

김형묵

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 042-868-3265

E-mail: kimh@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

최병희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

한공창

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학석사
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3241

E-mail: hankc@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원