암반공동 열에너지저장과 지상식 열에너지저장의 열손실 비교 분석

박정욱, 류동우*, 박도현, 최병희, 신중호, 선우춘

A Comparative Study on Heat Loss in Rock Cavern Type and Above-Ground Type Thermal Energy Storages

Jung-Wook Park, Dongwoo Ryu*, Dohyun Park,
Byung-Hee Choi, Joong-Ho Synn, Choon Sunwoo

Abstract A large-scale high-temperature thermal energy storage(TES) was numerically modeled and the heat loss through storage tank walls was analyzed using a commercial code, FLAC3D. The operations of rock cavern type and above-ground type thermal energy storages with identical operating condition were simulated for a period of five consecutive years, in which it was assumed that the dominant heat transfer mechanism would be conduction in massive rock for the former and convection in the atmosphere for the latter. The variation of storage temperature resulting from periodic charging and discharging of thermal energy was considered in each simulation, and the effect of insulation thickness on the characteristics of heat loss was also examined. A comparison of the simulation results of different storage models presented that the heat loss rate of above-ground type TES was maintained constant over the operation period, while that of rock cavern type TES decreased rapidly in the early operation stage and tended to converge towards a certain value. The decrease in heat loss rate of rock cavern type TES can be attributed to the reduction in heat flux through storage tank walls followed by increase in surrounding rock mass temperature. The amount of cumulative heat loss from rock cavern type TES over a period of five-year operation was 72.7% of that from above-ground type TES. The heat loss rate of rock cavern type obtained in long-period operation showed less sensitive variations to insulation thickness than that of above-ground type TES.

Key words Thermal energy storage (TES), Rock cavern type thermal energy storage, Above-ground type thermal energy storage, Heat loss

초 록 본 연구에서는 FLAC3D를 이용해 대용량 고온 열에너지저장소가 암반공동과 지상에 위치하는 경우를 각각 모델링하고 운영기간 5년 동안의 비정상상태해석을 수행하여 저장소 외벽을 통한 열손실을 비교·분석하였다. 두 저장모델의 운영 조건 및 입력물성은 모두 동일하나, 암반공동 열에너지저장소는 주변 암반의 전도 열전달에 의해서만 열손실이 발생하고, 지상 저장소는 대기의 대류 열전달에 의해서 열손실이 발생하는 것으로 가정하였다. 열에너지의 반복적인 주입과 토출에 따른 저장온도의 변화를 고려하여 수치해석모델을 작성하였으며, 단열재 두께에 따른 열손실 특성을 함께 검토하였다. 해석 결과, 지상식 저장시설은 운영 기간이 경과하더라도 일정한 열손실률을 보이는 반면 암반공동 저장시설의 열손실률은 운영 초기 단계에서 급격히 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이러한 열손실의 감소는 시간 경과에 따라 주변 암반의 온도가 상승함으로써 저장소 외벽에서의 열유속이 감소하기 때문으로 판단할 수 있다. 운영 후 5년 경과 시 암반공동 열에너지저장소의 누적열손실량은 지상저장소에 비해 약 72.7%로 나타났으며, 암반공동 저장시설의 열손실 특성은 주변 암반의 히팅 효과로 인해 지상식 저장시설에 비해 단열재 두께에 대한 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.

핵심어 열에너지저장, 암반공동 열에너지저장, 지상식 열에너지저장, 열손실

Received: Oct. 14, 2013

Revised: Oct. 28, 2013

Accepted: Oct. 28, 2013

***Corresponding Author:** Dongwoo Ryu

Tel) +82428683099, Fax) +82428683416

E-Mail) dwryu@kigam.re.kr

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

1. 서 론

열에너지 저장(thermal energy storage, TES)은 태양열, 지열과 같은 열원 기반 신재생에너지나 고온의 원자로열, 산업폐열과 같은 잉여 열원을 적절히 회수하여 다른 형태로 변환하지 않고 그대로 저장해 두었다가 소비처의 용도에 따라 냉난방이나 전력생산에 활용하는 것을 의미한다. 열에너지의 효과적인 저장 및 관리는 유효열원을 안정적으로 확보함으로써 전력 공급의 탄력성을 제고하고, 에너지 이용효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

열에너지는 저장온도에 따라 100℃ 이하는 주거용, 100-250℃ 범위는 주거용 및 산업용, 250℃ 이상 고온은 발전용으로 사용될 수 있으며, 저온 영역에서의 열에너지 저장 기술은 이미 상업적인 목적으로 널리 사용되고 있다(Shin et al., 1987). 고온 열에너지저장기술은 주로 태양열 발전설비에 활용되어 왔으며, 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(김진수와 강용혁, 2006).

대규모 열에너지를 저장하는 경우, 철재 컨테이너와 같은 지상구조물이 아닌 지하 암반공동을 활용하는 방식을 고려할 수 있으며 이를 암반공동 열에너지저장(cavern thermal energy storage, CTES)이라고 한다. CTES는 지상식 열에너지저장소에 비하여 입지 유연성이 좋고, 암반의 화학적 안정성 및 낮은 열전달 특성으로 인해 기밀성을 확보할 수 있다. 또한, 대수층 열에너지저장(aquifer thermal energy storage, ATEs)이나 보어홀 열에너지저장(borehole thermal energy storage, BTES)에 비해, 다양한 형태의 저장 방식과 매질을 선택할 수 있으므로 고온의 원자로열이나 산업폐열, 태양열 등의 대규모 저장에 유연하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 대용량 암반공동 열에너지저장 사례는 스웨덴 Lyckebo 지역의 열수저장시스템(SKANSKA, 1983)을 제외하면 전무한 실정이며, 국내외적으로 100℃ 이상의 고온 열에너지저장을 위한 운영시스템, 단열시스템 등에 대해서는 연구는 물론 개념설계조차 이루어지지 못한 상태이다. 특히 현재까지 대규모 열에너지저장기술 대부분이 태양열에너지와 연계된 지상 저장방식에 초점을 맞추어 연구개발되어 왔으므로, 지상시설 대비 암반공동 열에너지 저장방식의 저장타당성을 확보하기 위해서는 저장효율에 대한 정량적 평가 및 비교

· 검토가 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 대용량 고온 열에너지를 암반공동과 지상 구조물에 저장하는 경우를 각각 모델링하고, 반복적인 열에너지 주입 및 토출에 따른 열손실을 분석하였다. 유한차분 해석프로그램인 FLAC3D를 이용하여 저장소 외부의 전도와 대류에 의한 열손실을 모델링하였으며, 주입모드와 토출모드에서의 저장온도 변화를 고려해 운영 후 5년이 경과한 시점까지 비정상상태해석(transient state analysis)을 수행하였다.

2. AA-CAES와 연계된 열에너지저장시스템

본 연구의 해석모델은 AA-CAES(advanced adiabatic compressed air energy storage) 발전과 결합된 600℃ 이상의 열에너지 저장시스템으로, 저장조건 및 해석조건은 Kim et al.(2012)의 연구 및 Park et al.(2013)의 연구를 바탕으로 결정하였다. 이 절에서는 본문 기술에 앞서 AA-CAES 발전 및 상기한 연구들에 대해 간략히 소개함으로써 해석 개요 및 입력자료 산정에 대한 이해를 돕고자 하였다.

AA-CAES란 차세대 압축공기에너지저장 모델로서 공기의 압축과정에서 발생하는 고온의 열을 저장하였다가 발전 시 공기를 팽창시키는 데 이를 활용한다. 따라서 발전 과정에서 별도의 화석연료를 이용하여 공기를 팽창시키는 기존 CAES 모델에 비하여 발전효율을 크게 증대시킬 수 있다는 장점이 있다. 현재까지 AA-CAES 발전이 상용화된 사례는 없으나, 2010년 초부터 독일에서 RWE, General Electric, Züblin AG, German Aerospace Centre (DLR) 등의 기관을 중심으로 ADELE 프로젝트가 시작되어, 2016년까지 세계 최초의 AA-CAES 발전소 완공을 목적으로 관련 연구 및 기술개발이 진행되고 있다. 열에너지저장 모델로는 세라믹 벽돌이나 콘크리트, 자석성 충전층 등을 열저장 매질로 사용하는 고상축열방식이 고려되고 있으며(Zunft et al., 2006), 압축공기를 열전달유체로 직접 사용함으로써 열손실을 최소화할 수 있는 저장소 설계에 대한 연구도 진행 중에 있다(RWE power, 2011).

Kim et al.(2012)이 실시한 AA-CAES 발전의 에너지엑서지 분석(Fig. 1)에 따르면, 1단 압축, 1단 팽창방식을 통해 20℃, 1 bar의 공기를 50 bar로 압축하는 경우 공기 온도가 685℃로 증가하게 되며, 최종적으로 1.0 kWh의 발전출력을 얻기 위해서 시스템에 투입되어야 하는 엑서지는 1.48 kWh이다. 투입된 엑서지 중 열에너지 형태로 저장소에 주입되는 양은 1.43 kWh이며, 열에너지저장효율을 90%로 가정할 때 열에너지저장소

Fig. 1. Schematic diagram of an AA-CAES system in single-stage configuration(after Kim et al., 2012)

로부터 1.28 kWh의 열에너지를 토출할 수 있다.

Park et al.(2013)은 상기한 엑서지 분석을 바탕으로 100 MW 발전 규모 AA-CAES와 결합된 열에너지저장 시스템을 모델링하고, 열에너지저장소가 각각 지하암반과 지상에 있는 경우에 대하여 열에너지수지(thermal energy balance)와 성능효율(performance efficiency)을 분석하였다. 그들은 다공성 매질과 이를 통과하는 유체 간의 1차원 비정상열전달 이론해인 Schumann 모델(Schumann, 1929)을 적용하여 유한차분 코드를 작성하고, 50회의 반복적인 열에너지의 주입과 토출에 따른 저장소 내부의 온도 변화와 각 운영 모드에서의 주입 에너지, 토출에너지 및 손실에너지를 계산하였다. 운영 사이클은 6시간 주입, 6시간 대기, 6시간 토출, 6시간 대기 모드로 이루어진 1일 1주기 사이클로, 주입 모드에서는 685°C의 압축공기가 상단에서 유입되어 암석 충전층에 열에너지를 전달하고 냉각되어 하단을 통해 압축공기저장시설로 이동한다. 반대로 토출모드에서는 20°C의 압축공기가 하단으로부터 유입되어 암석 충전층으로부터 팽창에 필요한 열에너지를 회수한 뒤 상단으로 이동하는 시스템이다. 이들의 연구에서는 발전 규모(100 MW)와 주입/토출모드에서 압축공기의 목표 출구온도(주입모드 20~70°C, 토출모드 635~685°C)를 기준으로, 열에너지저장소를 높이 44 m, 단면직경 22 m의 원통형 모델로 설정하였다. 또한, 운영 후 50일까지의 비정상상태해석(transient state analysis)을 통해 저장소의 주입에너지율, 토출에너지율, 손실에너지율 및 압축공기의 출구온도가 시간 경과에 따라 규칙적인 패턴으로 수렴하는 경향을 관찰하였으며, 열손실과 토출 에너지효율 측면에서 지하암반이 지상구조물에 비해 더 안정적인 저장조건을 제공할 수 있다고 하였다. 그러나 여기에서 사용된 Schumann 모델은 고상 매질을

유동하는 유체의 1차원 열교환 모델로 유체 흐름의 직각 방향으로 발생하는 열손실을 고려하지 못한다. 다만, 이후의 여러 연구자들이 이를 열에너지저장소 내 열교환 문제에 적용하면서 측벽을 통한 열손실항을 추가해 Schumann 모델을 수정하였고(Coutier and Faber, 1982, Zanganeh et al. 2012), Park et al.(2013)의 연구에서 역시 이 수정식에 의해 열손실이 계산되었다. 하지만 이 식은 저장소 단면 반경 방향으로의 열전달을 정상상태(steady state)로 가정하므로 운영 초기의 열손실을 예측하기 어렵고, 저장소 측벽을 통한 열손실만을 고려하므로 중횡비가 작은 경우 저장소 상단부와 하단부를 통한 열손실을 지나치게 배제하여 비현실적인 예측 결과를 초래할 수 있다는 단점이 있다.

3. 수치해석을 통한 열에너지저장소의 열손실 분석

3.1 해석 개요

본 연구에서는 유한차분 수치해석 프로그램인 FLAC3D(Itasca, 2009)를 이용하여 동일한 물성과 운영조건을 갖는 열에너지저장소가 지하 암반공동 및 지상에 위치하는 경우를 각각 모델링하고, 저장소 외벽을 통해 발생하는 열손실량을 비교·분석하였다. 열에너지저장소의 크기와 운영 사이클 등은 앞서 2장에서 소개한 Park et al.(2013)의 연구와 동일하게 설정하였으며, 시간경과에 따른 열손실을 분석하기 위하여 운영개시 후 5년 경과시까지 비정상상태해석을 수행하였다.

Fig. 2는 (a)암반공동 열에너지저장소 및 (b)지상식 열에너지저장소에 대한 수치해석 모델을 보여주는 것으로, 대칭성을 고려하여 원통형 해석영역의 1/4만을 모델링하였다. 저장소가 암반에 위치하는 경우에는 외부의 열손실이 주변암반의 전도에 의해서 발생하는 것으로 가정하였으며 절리와 지하수의 영향은 고려하지 않았다. 암반의 초기온도를 모사하기 위하여 지표 15°C, 지중온도 증가율 0.025°C/m를 적용하였으며, 토 피고는 100 m, 해석영역은 저장소 측벽 및 하단부로부터 500 m 거리로 설정하였다. 저장소가 지상에 위치하는 경우에는 대기의 대류열전달에 의해 열손실이 발생하는 것으로 가정하였으며, 대기 온도는 2012년 국내 연평균기온인 12.3°C(기상청, 2012), 대류열전달계수는 25 W/m²K로 설정하였다. 대류열전달계수는 대류현상에 의해 고체 표면에서 유체에 전달되는 열의 크기를 나타내는 계수로서 단위온도에 의해 단위시간당 단위면적을 통과하는 열량을 의미하며, 기체의 경우 자연대류(natural convection)는 2~25 W/m²K, 강제대류(forced convection)는 25~250 W/m²K의 값을 갖는 것으로 알

(a) Rock cavern type TES

(b) Above-ground type TES

Fig. 2. Quarter-symmetry numerical model of thermal energy storage

려져 있다(Bergman et al., 2011). 참고로 ASHRAE (American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers) 위원회에서는 일반 건물의 실외 대류열전달계수로 $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하고 있으며 이는 풍속 6.7 m/s 를 기준으로 한 값이다(ASHRAE, 2009). 대류열전달계수가 표면과 유체의 온도차에 따라 증가하고 열에너지저장소의 표면 온도가 일반 건물에 비해 높을 것이라는 점을 감안할 때, 본 연구에서 설정한 $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 는 다소 보수적인 수치라 할 수 있다.

Fig. 3. Variation of storage temperature with time in charging and discharging modes**Table 1.** Input parameters used in the numerical simulations

Parameters	Value	Unit	Remarks
height of storage tank, H	44.0	m	
diameter of storage tank, D	22.0	m	
initial temperature of rock	$15.0 + 0.025 \times \text{depth}$	°C	rock cavern type storage
thermal conductivity of rock	3.0	W/mK	rock cavern type storage
specific heat of rock	862.0	J/kgK	rock cavern type storage
density of rock	2700.0	kg/m ³	rock cavern type storage
ambient air temperature	12.3	°C	above-ground type storage
convective thermal transfer coefficient	25.0	W/m ² K	above-ground type storage
thermal conductivity of insulation	0.05	W/mK	
thickness of insulation	0.1, 0.3, 0.5	m	
thermal conductivity of storage medium	1.97	W/m ² K	weighted average
specific heat of storage medium	930.5	J/kgK	weighted average
density of storage medium	2700.0	kg/m ³	
storage temperature	20-685	°C	Fig. 3

본 연구에서는 6시간 주입, 6시간 대기, 6시간 토출, 6시간 대기모드의 1일 1주기 운영 사이클을 가정하였으며, 열에너지의 반복적인 주입 및 토출에 따른 저장 온도 변화를 고려하기 위해 Fig. 3과 같은 온도 분포를 수치해석에 반영하였다. 이는 Park et al.(2013)의 연구 결과를 토대로 저장소 내 온도분포를 단순·도식화한 것으로, 내부온도 분포가 안정적인 열성층화(thermal stratification)에 도달하였을 때 (685-20)/44 °C/m의 일정한 온도구배를 갖는 것으로 가정하였다. 여기서 68 °C와 20 °C는 각각 주입모드와 토출모드에서 열전달유체(압축공기)의 입구온도로서 저장소 상단부와 하단부의 온도는 각각 토출모드와 주입모드의 목표 출구온도인 635-685 °C, 20-70 °C의 범위 내에 있는 것으로 설정하였다. 즉, 주입모드에서는 내부온도가 6시간 동안 Fig. 3의 T1에서 T2로 증가하게 되며 토출모드에서는 6시간 동안 T2에서 T1으로 감소하게 된다. 단, 주입모드에서 상단부의 온도는 열전달유체의 입구 온도인 68 °C로, 토출모드에서 하단부의 온도는 열전달유체의 입구온도인 20 °C로 고정하여 해석하였다. 대기모드에서는 모든 절점에서 온도 조건의 구속 없이 열전달해석이 수행된다. 열에너지저장소 내부의 비열 및 열전도도는 저장소 내부가 암석층전층(65%)과 공기(35%, 평균온도 352.5)로 채워져 있다고 가정하고 암석과 공기의 열물성을 가중 평균하여 산정하였으며, 이를 포함한 수치해석 입력자료는 Table 1과 같다.

3.2 해석결과 및 토의

3.2.1 저장소의 입지조건에 따른 열손실 분석

본 연구에서는 열에너지저장소로부터 외부환경(주변 암반 또는 대기)으로 손실되는 열에너지를 산정하기 위하여 저장소와 외부환경 사이를 통과하는 열유속(heat flux, W/m²)을 이용하였다. 해석스텝마다 각 단열재 요소에서 평균 열유속 벡터를 구한 뒤 방향별 열전달률(heat transfer rate, W)을 계산하고, 이를 합산하여 저장소의 열손실률(heat loss rate, W)을 산정하였다. 예비해석 결과, 저장소 상·하단부의 수평방향 열유속과 측벽부의 수직방향 열유속은 거의 제로에 가까워 무시할 수 있는 수치로 나타났으므로 상·하단부에서는 수직방향 열흐름만을, 측벽부에서는 수평방향 열흐름만을 열손실 산정에 반영하였다. 단, 측벽부의 경우 열흐름의 방향이 저장소의 반경방향이므로 열유속 벡터의 x, y 성분 및 요소의 방향 정보를 통해 벽면에 수직한 방향으로의 열손실률을 계산하였다. 지상저장의 경우, 하단부는 단열조건을 설정하였으므로 상단부와 측벽부를 통한 열손실만을 고려하였으며, 이를 수식으로 표현하면

(a) Rock cavern type TES

(b) Above-ground type TES

Fig. 4. Variation of heat loss rate over the first 5 days

식 (1), 식 (2)와 같다. 본 연구에서는 해석영역의 1/4만을 모델링하였으므로 저장소의 총 열손실은 각 해석결과를 4배하여 산정하였다.

for rock cavern type TES

$$\dot{Q}_{loss} = \sum_T A_z q_z + \sum_V A_r q_r - \sum A_z q_z \quad (1)$$

for above-ground type TES

$$\dot{Q}_{loss} = \sum_T A_z q_z + \sum_V A_r q_r \quad (2)$$

여기서 $\dot{Q}_{loss}$ 는 열손실률, T, V, B 는 각각 상단부(top), 측벽부(vertical wall), 하단부(bottom)를 이루는 단열재 요소를 의미하며, q_z, q_r 는 수직방향과 반경방향 열유속을, A_z, A_r 은 수직방향과 반경방향으로의 요소 단면적을 나타낸다. 식 (1)에서 하단부의 열손실은 좌표계상 음의 방향으로 발생하므로 열손실률 산정 시 부호를 반대로

(a) Rock cavern type TES

(b) Above-ground type TES

Fig. 5. Variation of heat loss rate over the last 5 days

하여 계산해야 한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 단열재의 두께가 0.3 m일 때의 해석 결과로 총 5년의 운영기간 중 (a)초기 5회 사이클(0~5일)과 (b)마지막 5회 사이클(1820~1825일)에서 구한 두 저장모델의 열손실률을 보여준다. 그림에서 c, i1, d, i2는 각각 주입모드, 1차 대기모드, 토출모드, 2차 대기모드를 의미하며, 상단부/하단부 벽면을 통한 열손실률과 측벽부를 통한 열손실률을 구분하여 함께 표기하였다. 기본적으로 열전달은 온도차에 기인하므로 운영모드에 따른 열손실률은 저장온도 변화와 함께 한 사이클 내에서도 지속적으로 변동하게 된다. 즉, 열에너지 주입모드(c)에서는 저장온도 증가로 인해 열손실률도 함께 증가하게 되며, 반대로 토출모드(d)에서는 저장온도 감소로 인해 열손실률이 감소하게 된다. 외부로부터의 열에너지 출입이 없는 대기모드(i1과 i2)에서는 저장온도가 비교적 일정하게 유지되면서 열손실률이 큰 변화를 보이지 않지만, 실제 외부로의 열전달에 의해 저장온도가 감소하게 되므로 열손실률은 미세하게 감소

Fig. 6. Variation of heat loss rate over 5-year operation period

Fig. 7. Cumulative heat loss over 5-year operation period

하는 경향을 보였다. 한 운영 사이클 내에서 열손실률이 최대, 최소인 시점은 각각 주입모드 종료시점과 두 번째 대기모드 종료시점이라고 할 수 있다. 두 저장모델에서 모두 저장온도가 높은 상단부에서 열유속이 가장 크게 나타났으며, 면적이 큰 측벽부를 통한 열에너지 손실이 전체의 약 80% 수준을 보이는 것으로 나타났다. 암반공동 열에너지저장소의 경우 저장온도가 비교적 낮은 하단부에서는 열손실이 크지 않은 것으로 나타났다.

초기 5회 사이클에서 열손실률은 암반공동의 경우 185.5~243.1 kW, 지상구조물의 경우 190.3~242.1 kW로 대체로 유사한 범위를 보였지만, 마지막 5회 사이클에서는 각각 169.8~117.5 kW, 190.3~242.0 kW로서 지상식 저장소에 비해 암반공동 열에너지저장소의 열손실률이 현저히 낮은 수치를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8. Variation of rock temperature over 5-year operation **Fig. 9.** Variation of heat flux over 5-year operation period

(a) after 6-month operation

(b) after 1-year operation

(c) after 3-year operation

(d) after 5-year operation

Fig. 10. Temperature contours after 6 months, 1 year, 3 years and 5 years

Fig. 6은 두 저장모델의 열손실률 변화를 전체 운영 기간인 5년에 걸쳐 나타낸 것으로서 지상식 열에너지저장소의 열손실률은 거의 동일한 수치를 유지하는 반면, 암반공동 열에너지저장소의 열손실률은 지속적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 열손실률은 운영 초기 급격한 감소를 보이다가 시간 경과에 따라 서서히 수렴하는 경향을 보인다. 열손실률을 thermal real time으로 적분하면 Fig. 7과 같은 누적열손실량을 구할 수 있으며 운영 후 1, 3, 5년이 경과한 시점에서 지하공동 열에너지저장소의 누적열손실량은 지상식 열에너지저장소의 약 75.7%, 73.5%, 72.7%에 그치는 것으로 나타났다.

암반공동 열에너지저장소의 열손실률 감소는 운영 사이클이 경과함에 따라 주변 암반의 온도가 상승하기 때문으로 해석할 수 있다. 저장소 내외의 온도차가 감소하면 외벽을 통한 열유속이 작아지므로 외부로의 열손실률이 감소하게 된다. Fig. 8과 Fig. 9는 암반공동의 상단부와 측벽부에 인접한 두 지점(P1, P2)에서의 온도 변화 및 단열재를 통과하는 열유속을 보여주는 것으로 각 측정지점은 그림에 표시된 바와 같다. P1과 P2 지점의 온도는 운영 초기에 급격히 증가하다가 시간의 경과에 따라 증가폭이 감소하면서 운영 후 5년 경과 시 약 251°C, 141°C를 나타내었으며, 운영 기간이 조금 더 지속된다면 일정한 온도로 수렴하여 정상상태(steady state)에 도달할 것을 예상할 수 있다. 각 지점에 인접한 단열재를 통해 암반에 전달되는 열유속(P1: 수직방향, P2: 반경방향) 역시 서서히 감소하여 일정한 값에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 스웨덴 Lyckebo 열수저장시설의 운영사례(SKANSKA, 1983) 및 Park et al.(2012)의 연구에서도 보고된 바 있다. Lyckebo 열수저장시설의 경우 약 5년간의 운영기간에

걸쳐 열손실이 175 kW로 수렴한 것으로 조사되었으며, Park et al.(2012)은 Lyckebo 시설에 대한 CFD 해석을 통해 장기 운영에 따른 암반의 히팅(heating, 암반 40°C, 65°C) 조건을 가정하는 경우, 초기 운영 조건(암반 7°C)에 비해 외부로의 열손실이 현저히 감소하였다고 보고하였다.

Fig. 10은 운영 후 6개월, 1년, 3년, 5년이 경과한 시점에서 저장공동과 주변암반의 온도 분포를 나타내는 그림이며, 저장공동 내부와 주변암반의 큰 온도차를 고려해 300°C 이상은 모두 검은 색으로 표현하였으며, 흰색으로 표현된 부분은 온도가 25°C 이하인 지점을 가리킨다. 운영 시간이 경과함에 따라 주변암반의 온도가 서서히 증가하였고, 공동 상단부의 높은 저장온도로 인해 측벽부나 하단부보다 상단부 주변 암반의 온도증가 폭이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 운영 후 5년이 경과했을 때, 저장공동 상단부 중심으로부터 8, 18 m(수직방향) 이격거리에 있는 암반의 온도는 각각 121.1, 51.5°C였으며, 저장공동 측벽부 중심(22 m 높이)으로부터 8, 18 m(수직방향) 이격거리에 있는 암반의 온도는 각각 78.3°C, 39.9°C인 것으로 해석되었다. 덧붙여, 터널과의 이격거리가 50 m 이상인 지점에서는 모든 방향에서 암반 온도의 변화가 1°C 미만인 것으로 나타났다.

3.2.2 단열재의 두께에 따른 열손실 분석

본 연구에서는 단열재 두께가 0.1, 0.3, 0.5 m인 경우를 모델링하고 각 해석모델에서의 열손실률을 비교·분석하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각 저장모델에서 5년간의 운영기간 동안 발생하는 열손실률 및 누적열손실량을 단열재의 두께에 따라 나타낸 것이다. 단열재의 두께가 0.1, 0.5 m인 경우에도 3.2.1절에 설명한 0.3 m인

(a) Rock cavern type TES

(b) Above-ground type TES

Fig. 11. Variation of heat loss rate over 5-year operation period according to insulation thickness

Fig. 12. Cumulative heat loss over 5-year operation period according to insulation thickness

Fig. 13. Comparison of heat loss rate according to insulation thickness and TES model

경우와 같이, 운영 초기에는 두 저장모델의 열손실이 유사한 수치를 보이다가 시간의 경과에 따라 지하공동 열에너지저장소의 열손실이 감소하여 일정 수치로 수렴하는 경향을 보인다. 특히, 단열재의 두께가 작아지면 열손실률은 증가하는 반면, 열손실률의 감소가 더 급격히 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 (a)첫 번째와 (b)마지막 운영 사이클에서 두 저장모델의 열손실률을 단열재의 두께에 따라 표현한 것으로 각 floating box의 상단과 하단은 해당 사이클에서의 최대 열손실률과 최소 열손실률을 보여주는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 한 운영 사이클 내에서 열손실률이 최대, 최소인 시점은 각각 주입모드 종료시점과 두 번째 대기모드 종료시점이다. 단열재 두께의 증가에 따라 손실률의 절대값 및 변동 정도(최대손실률-최소손실률)가 모두 감소함을 확인할 수 있다. (b)에

표시된 수치는 마지막 운영 사이클에서 지상식 저장시설의 최대/최소 열손실률 대비 암반공동 저장시설의 최대/최소 손실률을 백분율로 표시한 것으로서 단열재의 두께가 작을 때 지하저장의 장기운영에 따른 열손실률 감소폭이 더 크게 나타났고, 특히 단열재의 두께가 0.1 m인 경우에는 지상저장에 비해 절반 이하의 열손실률과 누적열손실량(Fig. 12)을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 14에 도시한 바와 같이 단열재의 두께가 작으면 주변 암반의 온도가 급격히 상승하면서 고온의 암반 히팅 조건이 더 빠른 속도로 형성되기 때문으로 판단할 수 있다.

한편, 마지막 운영 사이클에서 각 모델의 단열재 두께에 따른 열손실률을 비교해 보면, 지상식 저장시설의 경우 단열재 두께에 대한 열손실률의 민감도가 크게 나타나는 반면, 암반공동 저장시설은 열손실이 수렴하면

Fig. 14. Comparison of rock temperature according to insulation thickness

서 단열재 두께에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 암반공동 저장소의 단열재 두께가 0.1, 0.3 m일 때 평균 열손실률은 253.1, 143.6 kW로서 지상식 저장소의 단열재가 0.3, 0.5 m일 때의 평균 열손실률인 216.1, 132.0 kW와 큰 차이를 보이지 않았고, 이때 최소 열손실률은 오히려 더 작은 수치를 보이기도 하였다. 이러한 수치해석 결과는 암반공동을 활용한 열에너지 저장이 지상식 열에너지저장소에 비해 단열재 시공비용을 크게 절감할 수 있음을 보여준다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 FLAC3D를 이용해 고온(20-685°C) 열에너지를 저장하는 암반공동 저장시설과 지상식 저장시설을 모델링하고 비정상상태해석을 통해 운영 시간의 경과에 따른 각 저장 모델의 열에너지 손실률 및 손실량을 분석하였다. 운영 사이클은 6시간 주입, 6시간 대기, 6시간 토출, 6시간 대기모드로 이루어진 1일 1주기 시스템이며, 단열재의 두께에 대한 영향도 함께 논의하였다. 수치해석을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

운영 후 5년간의 비정상상태해석을 통해 각 저장모델의 열손실률과 누적열손실량을 비교검토한 결과, 지상식 열에너지저장소의 열손실률은 거의 동일한 수치를 유지하는 반면, 암반공동 열에너지저장소의 열손실률은 운영 초기 급격한 감소를 보이다가 시간 경과에 따라 서서히 수렴하는 경향을 보였다. 단열재의 두께가 0.3 m일 때 운영 후 5년이 경과한 시점에서 지하공동 열에너지저장소의 열손실률은 169.8-117.5 kW로 지상식 열손실률인 190.3-242.0 kW에 비해 현저히 낮은 수치

를 보였으며, 누적열손실량은 지상식 열에너지저장소의 약 72.7%로 나타났다. 이러한 열손실률의 감소는 주변 암반의 온도가 상승함에 따라 저장소 내외의 온도차 및 외부로의 열유속이 감소하기 때문인 것으로 분석되었다.

한편, 단열재의 두께가 0.1, 0.3, 0.5 m인 경우의 열손실을 비교분석한 결과, 암반공동 열에너지저장소의 단열재 두께가 작아지면 열손실률 및 누적열손실량의 증가하지만, 주변 암반의 온도 상승이 급격히 진행되면서 시간 경과에 따른 열손실률의 감소폭이 크게 더 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 암반공동 저장시설의 열손실 특성은 주변 암반의 히팅 효과로 인해 지상식 저장 시설에 비해 단열재 두께에 대한 민감도 및 의존도가 낮은 것으로 나타났으며, 단열재 두께가 0.1 m인 경우에는 암반공동 저장시설의 열손실률과 누적열손실량이 지상저장의 절반 이하로 분석되어 단열재 시공비용의 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단할 수 있었다. 덧붙여, 지상의 경우 저장소와 대기의 온도차뿐만 아니라 강우나 풍속과 같은 요인에 의해 대류열전달계수가 가변적인 반면, 지하암반은 열전달특성이 거의 변하지 않는다는 점을 고려할 때 저장소의 안정적 운영이라는 측면에서도 지하암반 내 열에너지저장의 장점을 찾을 수 있다.

하지만, 암반공동 저장시설의 효율성을 적절히 평가하고 저장 타당성을 확보하기 위해서는 아직 여러 가지 문제에 대한 신중한 검토가 필요하다. 열손실 예측과 관련해서 향후 암반 내 절리와 지하수의 영향이 면밀히 고려될 필요가 있으며, 고온 열에너지 저장 시 암반의 온도가 100°C 이상으로 증가할 수 있으므로(Fig. 14 참조), 지하수의 기화 현상, 증기압 증가, 불포화대 형성 등으로 인한 암반의 열환경 변화가 수치해석에 반영되

어야 할 것이다. 또한, 두 저장방식의 장단점을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 암반공동의 굴착 및 유지비용 등을 고려한 경제성 분석 및 성능효율 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

사 사

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

References

1. 김진수, 강용혁, 2006, 고온 축열 기술개발동향. 태양에너지, Vol. 5, No. 2, pp. 12-19.
2. ASHRAE, 2009, ASHRAE Handbook-Fundamentals.
3. Bergman, T.L., A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, 2011, Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Seventh edition, Wiley, Hoboken, pp. 605.
4. Coutier, J.P., E. Farber, 1982, Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds. Solar Energy, Vol. 29, pp. 451-462.
5. Itasca Consulting Group Inc., 2009, FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) version 4.0. Minneapolis: ICG.
6. Kim, Y.M., J.H. Lee, S.J. Kim, D. Favrat, 2012, Potential and evolution of compressed air energy storage: energy and exergy analyses. Entropy, Vol. 14, pp. 1501-1521.
7. Korea Meteorological Administration, 2012, Annual climatological report.
8. Park, D., H.M. Kim, D.W. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo, K.C. Han, 2012, Numerical study on the thermal stratification behavior in underground rock cavern for thermal energy storage (TES). Tunnel and Underground Space, Vol. 22, No. 3, pp. 188-195.
9. Park, J.W., D.W. Ryu, D. Park, B.H. Choi, J.H. Synn, C. Sunwoo, 2013, Thermal energy balance analysis of a packed bed for rock cavern thermal energy storage. Tunnel and Underground Space, Vol. 23, No. 3, pp. 241-259.
10. RWE Power, 2011, ADELE-Adiabatic compressed-air energy storage for electricity Supply. Brochure, <http://www.rwe.com>.
11. Schumann, T.E., 1929, Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. Journal of the Franklin Institute. Vol. 208, pp. 405-416.
12. Shin, B.C., S.D. Kim, K.Y. Park, 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.
13. SKANSKA, 1983, Swedish rock technique: Lyckebo seasonal energy storage plant, SKANSKA technical brochure.
14. Zanganeh, G., A. Pedretti, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Steinfeld, 2012, Packed-bed thermal storage for concentrated solar power-Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. Solar Energy, Vol. 86, pp. 3084-3098.
15. Zunft, S., C. Jakiel, M. Koller, C. Bullough, 2006, Adiabatic compressed air energy storage for the grid integration of wind power. Sixth international workshop on large-scale Integration of wind power and transmission networks for offshore wind farms, pp. 26-28.

박 정 욱

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학석사
2011년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부 공학박사

TEL: 042-868-3246

E-mail: jwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 연구원

류 동 우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

TEL: 042-868-3099

E-mail: dwryu@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원

박 도 현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2009년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

TEL: 042-868-3913

E-mail: parkdo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 선임연구원

최 병 희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템
공학과 공학박사

TEL: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원

신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

TEL: 042-868-3242

E-mail: jhsynn@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원

선 우 춘

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 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 지구환경연
구본부 책임연구원