전산유체역학을 이용한 다중 열저장공동의 이격거리별 열적 성능 분석

박도현*, 박의섭, 선우춘

Thermal Performance Analysis of Multiple Thermal Energy Storage (TES) Caverns with Different Separation Distances Using Computational Fluid Dynamics

Dohyun Park*, Eui-Seob Park, Choon Sunwoo

Abstract In the present study, the thermal performance of multiple rock caverns for large-scale thermal energy storage (TES) was numerically investigated for different separation distances between the caverns through heat transfer analysis using a computational fluid dynamics code, FLUENT. The thermal performance of multiple caverns was assessed in terms of the thermal stratification within the caverns and the heat loss to the surroundings, and the heating characteristics of the rock around the caverns were investigated. The results of numerical simulation showed that there was little difference in thermal performance between multiple TES caverns with different separation distances when the surrounding rock was less heated and it reached thermal steady-state, which represent the thermal states of the surrounding rock at the early and long-term operational stages of the TES caverns, respectively. However, as the separation distance decreased, the rock between the caverns reached thermal steady-state more quickly, and thus the heat loss from the caverns tended to converge rapidly to the value of heat loss occurred under thermal steady-state conditions in the surrounding rock. This result implies that the operating cost of heating the surrounding rock (i.e., rock heating) can be reduced with a reduction in the separation distance between multiple caverns, and suggests that the separation distance should be determined by considering the operating cost of rock heating as well as the construction cost of the caverns.

Key words Cavern thermal energy storage, Multiple rock caverns, Separation distance, Thermal performance, Thermal stratification, Heat loss

초 록 본 연구에서는 전산유체역학 코드인 FLUENT를 이용한 열전달 해석을 통해 대규모 열에너지 저장을 위한 다중 암반공동의 이격거리별 열적 성능을 분석하였다. 저장공동 내부의 열성층화와 공동 외부로의 열손실 측면에서 열적 성능을 평가하였으며, 이격거리별로 시간경과에 따른 공동 주변 암반의 히팅 특성을 조사하였다. 분석 결과, 주변 암반이 히팅되지 않은 초기 운영단계와 암반이 열적 정상상태에 도달한 장기 운영단계에서는 다중 암반공동의 이격거리에 따른 열적 성능의 차이가 거의 없는 것으로 검토되었다. 그러나 공동간 이격거리가 감소함에 따라 공동 사이의 암반이 열적 정상상태에 더 빠르게 도달하고, 이에 따라 저장공동 외부로의 열손실이 주변 암반의 열적 정상상태 조건에서의 열손실 값으로 빠르게 수렴하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 다중 암반공동의 이격거리를 줄임으로써 주변 암반의 히팅에 소요되는 운영비용을 줄일 수 있음을 나타내며, 이로부터 다중 열저장 공동의 이격거리 결정시 공동의 건설비용과 함께 암반히팅에 대한 운영비용을 고려해야 함을 알 수 있었다.

핵심어 암반공동 열에너지 저장, 다중 암반공동, 이격거리, 열적 성능, 열성층화, 열손실

Received: May 7, 2014

Revised: May 20, 2014

Accepted: May 20, 2014

***Corresponding Author:** Dohyun Park

Tel) +82428683913, Fax) +82428683416

E-Mail) parkdo@kigam.re.kr

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

1. 서 론

열에너지 저장(thermal energy storage, TES)은 고온 또는 저온의 에너지를 특정 공간에 장단기적으로 저장하는 기술로써, 에너지의 수요와 공급의 시간적 및 양적 차이를 보완하는 기능을 수행하며, 이를 통해 에너

지를 절약하고 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다. 열 에너지 저장소의 열적 성능(thermal performance)은 저장소 내 유체의 열성층화(thermal stratification)에 의해 좌우되는데, 이는 목표 저장온도 범위 내에서 열에너지가 성층화되지 않고 하나의 온도로 혼합된 경우, 필요 시 원하는 온도로 활용하기 위해서는 추가적인 열교환이 요구되기 때문이다. 열성층화는 온도에 따라 밀도가 변하는 유체의 특성으로 인해 고온과 저온의 유체가 층을 이루는 현상을 의미하며, 이를 통해 이용가능한 유효에너지(available energy or exergy)를 증대시켜 열저장 시스템의 에너지 이용효율을 향상시킬 수 있다. 저장소 내부의 열성층화에 영향을 미치는 주요 인자 중 하나는 저장소의 종횡비(aspect ratio, 저장소의 폭에 대한 높이의 비)로써, 종횡비가 커질수록 열성층화가 높게 유지되는 것으로 알려져 있다(Joo 외, 2008, Park 외, 2013). 그러나 종횡비가 증가함에 따라 저장소의 폭에 비해 높이가 커지고, 이는 저장소의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용할 수 있다. 특히 지하 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 암반공동의 저장용량(굴착규모) 및 종횡비, 암반조건(암반의 변형 및 강도 특성, 현저응력 등)에 의해 공동의 안정성이 영향을 받으므로 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 설계가 어려울 수 있으며, 이 경우 설계 저장용량의 단일 암반공동 대신 단위 저장용량을 줄인 다중 암반공동의 적용을 고려할 필요가 있다(Park 외, 2013). 또한 설계 저장용량 확보를 위한 긴 터널형의 단일 저장공동이 열저장 및 주입을 위한 지상설비와의 연결에 있어 효율적이지 못한 경우에도 종방향 길이를 줄인 다중 암반공동의 활용을 고려할 필요가 있다(Park 외, 2014).

다중 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 공동간 이격거리는 저장공간 계획시 고려해야 하는 주요 설계인자이며, 이격거리 결정시 공동의 구조 안정성(structural stability)뿐만 아니라 열저장소의 장기 운영에 따른 주변 암반의 히팅 특성을 고려할 필요가 있다. 이는 다중 암반공동의 이격거리가 가까울수록 공동 주변 암반의 거동이 역학적 및 열적으로 상호 간섭하게 되는데, 역학적 거동(암반의 변형)에 대한 상호 간섭은 공동의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용(Park 외, 2014)하는 반면, 열적 거동(암반 내 열전달)에 대한 상

호 간섭은 암반의 히팅 효율, 즉 열적 성능 측면에서 유리하게 작용할 수 있기 때문이다. 따라서 다중 열저장공동을 활용하는 경우, 공동간 이격거리에 따른 역학적 안정성 분석과 함께 열적 성능에 대한 분석이 병행될 필요가 있다.

다중 지하구조물의 역학적 안정성 분석과 관련된 연구는 토목 및 광산 시설(도로 및 철도 터널, 광산 갱도 등)을 대상으로 기존에 다양하게 수행되어 왔으나, 열 에너지 저장을 위한 다중 지하구조물의 열적 성능 분석에 대한 연구결과는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다중 암반공동을 활용한 열에너지 저장시 공동간 이격거리가 저장소의 열적 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 이를 토대로 다중 열저장공동의 설계시 고려해야 할 사항들을 파악하고자 하였다. 대규모 지하 열수(hot water) 저장을 위한 다중 암반공동을 대상으로 이격거리별 열적 성능을 조사하였으며, 이를 위해 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 열전달 해석(heat transfer analysis)을 수행하였다. 다중 암반공동의 열적 성능은 저장공동 내부의 열성층화와 공동 외부로의 열손실 측면에서 평가되었으며, 이격거리별로 운영시간 경과에 따른 공동 주변 암반의 히팅 특성을 조사하였다.

2. 열전달 해석을 위한 수치 모델링

2.1 입력 물성

본 연구에서는 다중 암반공동의 열적 성능을 분석하기 위해 CFD 수치해석 프로그램인 FLUENT(ANSYS, 2014)를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 해석에 적용한 물의 물성(밀도, 비열, 열전도도, 점성)은 Fig. 1과 같으며, 그림에서와 같이 온도에 따른 물의 열적 특성 변화를 고려하였다. 암석의 물성(밀도, 비열, 열전도도)으로는 KIGAM(2012)의 국내 황등 화강암과 단양 석회석에 대한 실내시험 자료를 적용하였다(Table 1). 참고로 KIGAM(2012)에서는 국내의 화강암과 석회암 지역을 대상으로 지하 열에너지 저장 연구를 수행하였으며, 황등 화강암과 단양 석회석을 대표 암종으로 선정하여 역학적 및 열적 물성을 조사하였다.

Table 1. Properties of rock used in the present study (KIGAM, 2012)

Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/m ³ -K)	Heat conductivity (W/m-K)
2,680	2,310	3.0

Fig. 1. Thermal properties of water with respect to temperature used in the present study

2.2 다중 열저장공동의 이격거리별 수치 모델 및 해석 조건

2.2.1 수치 모델

본 연구에서는 Park 외(2014)의 다중 암반공동을 대상으로 이격거리별 열적 성능을 분석하였다. Park 외(2014)의 연구에서 사용한 다중 암반공동은 국내 주거 지역의 열수 공급을 위한 터널형 열저장공동으로써, 단

일 공동의 종횡비와 종방향 길이는 각각 2(공동 폭 = 29 m, 높이 = 58 m)와 50 m이었고, 저장용량은 약 84,000 m³이었다. 이 용량은 아파트 1,000세대(세대당 주거면적 106 m²)가 동절기 2개월 동안 열수를 사용할 수 있는 부피이다. 위의 단일 저장공동을 다중 배치하는 경우 공동간 이격거리가 열적 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 Table 2와 같이 해석조건을 설정하였다. 표

Table 2. Separation distances between the twin tunnel-shaped rock caverns with an aspect ratio of 2.0

Separation distance between caverns (m)	R_{d-w}
15	0.52
30	1.03
45	1.55
60	2.07
75	2.59
90	3.10
105	3.62

R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio

Fig. 2. Numerical model used for assessing the thermal performance of the twin tunnel-shaped rock caverns (W_p = Separation distance between the caverns)

에서 R_{d-w} 는 저장공동의 굴착 폭에 대한 다중 공동간 이격거리의 비를 나타내며, 여기서 이격거리는 두 개 공동의 인접한 굴착 벽면 사이의 수평 직선거리이다. 다중 공동의 이격거리별 열적 성능 평가를 위한 수치모델은 Fig. 2와 같다. 해석영역은 가로 801 m, 세로 456 m이었으며, 공동의 설치 심도는 지표면-공동 천단부 거리 기준으로 50 m로 설정하였다.

2.2.2 해석 조건

저장공동의 운영시간 경과에 따른 공동 내 열에너지의 온도 변화를 분석하기 위해 비정상상태(transient state) 해석을 수행하였으며 고려한 총 해석시간은 10일이었다. FLUENT의 solid 조건을 이용하여 주변 암반을 모델링하였고, 주변 암반을 불투수층으로 가정하여 암반 내 지하수의 영향을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 저장공동 내부에 단열시스템을 적용하지 않은 열저장 모델을 대상으로 하였고, 공동 내 저장되는 물과 주변 암반 사이에 형성되는 wall의 경계에는 coupled 조건을 적용하여 유체와 고체간의 열전달이 가능하도록 하였다. 주변 암반의 초기 온도는 기상청 자료를 토대로 18°C로 설정하였다. 암반의 초기 온도(18°C)는 KMA(2011)에서 측정한 지하 5 m 심도의 전국 땅속 온도의 평균값(15.3°C)과 암반공동의 바닥부와 지표면 사이의 거리(108 m)를 고려한 온도이다(국내 평균 지온 증가율 25°C/km(Song, 2008)를 적용함). 지표면에는 자연대류 열전달 계수(free-convective heat transfer coefficient) 9 W/m²-K와 대기 온도(ambient temperature) 25°C인 대류 경계조건을 적용하여 지표면과 대기의 열교환을 고려하였다. 위의 자연대류 열전달 계수는 Takakura(1989)가 제안한 식 (1)을 토대로 산정되었다.

Fig. 3. Initial temperature distribution of stored water assumed in the present study

$$h_c = 4.6 dT^{0.33} \quad (1)$$

여기서 h_c 는 지표면에서의 자연대류 열전달 계수(W/m²-K), dT 는 지표면과 대기의 온도 차이(K)를 나타낸다.

본 연구에서는 국내 주거지역의 열수(열교환용 난방수와 직접사용 급탕수) 공급을 위한 지하 열저장 모델을 고려하였다. KDHC(2013)에 따르면, 공동주택 난방시 열교환용 공급온도는 75-115°C이고, 사용온도는 난방의 경우 45-60°C, 급탕의 경우 45-55°C이다. 이로부터 열교환용 열수 공급과 저장온수의 직접 사용을 위한 온도 범위는 45-115°C인 것을 알 수 있다. 이를 토대로 암반공동 내 열수 저장을 위한 온도 범위를 50-95°C로 설정하였다. 본 연구에서는 100°C 미만의 열에너지 저장을 대상으로 하여 저장온도 범위의 상한값을 95°C로 설정하였고, 저장온도 범위의 하한값(50°C)은 열에너지 저장 후 발생하는 외부로의 열손실을 고려하여 사용온도 범위의 하한값인 45°C에 5°C를 추가한 온도이다. 열전달 해석을 위한 저장공동 내 물의 초기 온도분포는 Fig. 3과 같이 공동의 바닥부에서부터 천정부까지 일정한 온도구배(temperature gradient)를 갖는 열성층화 상태를 가정하였다.

본 연구에서는 저장공동의 장기 운영으로 인한 주변 암반의 히팅이 공동의 열적 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 주변 암반의 온도분포를 달리하여 열전달 해석을 수행하였다. 고려한 주변 암반의 온도조건은 두 가지로써 열에너지 저장을 시작하기 전의 초기 암반온도(18°C)인 경우(초기 운영단계)와 저장온도(50-95°C)의 평균인 72.5°C의 열에너지에 의해 암반이 히팅되는

(a) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 0.52

(b) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 3.62

Fig. 4. Temperature distributions of the surrounding rock at the long-term operational stage

경우(장기 운영단계)이었다. 72.5℃의 열에너지에 의해 암반이 히팅된 경우의 온도분포는 저장공동 내 물의 온도를 72.5℃로 일정하게 유지시킨 정상상태(steady state) 해석으로부터 얻은 결과를 적용하였다(Fig. 4). 참고로 스웨덴 Lyckebo 열수 저장공동의 열성층화 거동을 분석한 Park 외(2012)에 따르면, 저장공동의 운영 초기에는 공동 내 열에너지에 의한 암반의 히팅이 거의 발생하지 않으므로 열에너지 저장을 시작하기 전의 암반온도를 적용한 해석결과는 초기 운영단계에서의 결과로 간주할 수 있고, 저장공동을 장기 운영함에 따라 주변 암반이 저장온도의 평균값에 반복 노출되므로 물의 온도를 저장온도의 평균값으로 일정하게 유지시킨 정상상태 해석으로부터 얻은 암반의 온도분포는 장기 운영 단계에서 온도분포 중의 하나로 간주할 수 있다.

3. 다중 열저장공동의 이격거리별 열적 성능 분석결과

3.1 이격거리별 열성층화 거동

다중 암반공동 내 열수 저장 후 시간경과에 따른 물의 온도 변화는 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 그림에서 무차원 높이(dimensionless height)는 저장공동 바닥부

(a) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 0.52

(b) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 1.55

(c) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 3.62

Fig. 5. Temperature variations of stored water with time in the case without rock heating

기준으로 측정된 공동 내 연직높이 z 를 암반공동의 높이 H 로 나눈 변수($= z/H$)이다. 이와 같이 저장소 내 위치별 온도 분포를 그래프로 표현하여 성층화 정도를 평가하는 것은 도해적 방법(graphical method)에 해당되며 성층도의 정성적인 평가에 활용된다.

(a) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 0.52

(b) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 1.55

(c) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 3.62

Fig. 6. Temperature variations of stored water with time in the case with rock heating at 72.5°C

Fig. 5와 Fig. 6에 표시된 시간은 열에너지 저장 후 경과한 시간, 즉 대기 운영모드(standby mode of operation) 시간을 의미하며, 시간 = 0에서의 실선은 본 연구에서 가정한 초기 열성층화 상태(Fig. 3 참조)를 나타낸다. 이 실선으로부터 편차가 커질수록 열성층화가 감소하는

것을 의미하며, 특정 무차원 높이에서 온도는 해당 높이의 수평선을 따라 측정된 열에너지의 온도 평균값을 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 공동간 이격거리와 암반의 히팅 여부에 관계없이 시간경과에 따라 열성층화가 점차적으로 감소, 즉 초기 열성층화시 온도분포와의 편차가 점차 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이러한 편차는 암반이 히팅되지 않은 경우에 더 크게 발생하였다. 한편 암반이 히팅되지 않은 경우(Fig. 5)와 72.5°C로 암반이 히팅된 경우(Fig. 6)의 열성층화 거동을 살펴보면, 공동간 이격거리에 따른 열성층화의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.

위와 같이 도해적 방법에 의해 분석된 시간경과에 따른 열성층화의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 Shyu 외(1989)가 제안한 변온층 구배법(thermocline gradient method)을 이용하여 열성층화 비(thermal stratification ratio)를 분석하였다. 변온층 구배법은 성층화 상태로 저장된 열에너지의 온도구배를 이용하는 방법으로 식 (2)에 의해 열성층화 비가 계산된다. 열성층화 비가 1인 경우는 열에너지 저장 초기에 형성된 열성층화 조건을 그대로 유지하고 있는 상태(stratified)를 의미하고, 0인 경우는 초기에 형성된 온도층의 경계가 완전히 사라지고 하나의 온도로 열에너지가 혼합된 상태(mixed)를 의미한다.

$$R_{TS} = \left(\frac{dT}{dz} \right)_t / \left(\frac{dT}{dz} \right)_i \quad (2)$$

여기서 R_{TS} 는 열성층화 비, T 는 온도(°C), z 는 열에너지 저장소 바닥으로부터의 높이(m), i 는 열에너지 저장의 초기 시점, t 는 경과한 시간을 의미한다.

식 (2)에 의해 다중 암반공동의 이격거리별 열성층화 비를 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. 그림으로부터 시간경과에 따라 열성층화 비가 점차적으로 감소하고, 암반이 히팅된 경우(Fig. 7(b))가 그렇지 않은 경우(Fig. 7(a))에 비해 열성층화 비가 상대적으로 높게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 저장공동의 장기 운영으로 인해 주변 암반이 충분히 히팅되는 경우, 저장된 열에너지와 암반의 온도차이가 줄어들어 공동 외부로의 열손실이 감소하여 나타난 결과로 판단된다. 또한 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)로부터 공동간 이격거리에 관계없이 시간경과에 따라 열성층화 비가 거의 비슷한 수준을 유지하는 것을 알 수 있으며, 이는 암반이 히팅되지 않은 초기 운영단계와 암반이 열적 정상상태에 도달한 장기 운영단계에서는 이격거리가 열성층화에 미치는 영향이 거의 없음을 나타낸다.

(a) Case without rock heating

(b) Case with rock heating at 72.5°C

Fig. 7. Thermal stratification ratios for different separation distances (R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio)

3.2 이격거리별 열손실

Fig. 8은 다중 암반공동의 이격거리에 따른 공동 외부로의 열손실을 분석한 결과로써, 저장공동 벽면부에서 발생하는 열유속(heat flux, 단위 면적당 열손실) 값을 나타낸다. 그림으로부터 암반이 히팅되지 않은 경우와 히팅된 경우 모두 이격거리별로 열유속이 비슷한 수준으로 발생하고, 암반이 히팅된 장기 운영단계에서의 열손실이 초기 운영단계에 비해 약 1/14로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 암반이 히팅되지 않은 경우에는 평균 71.5 W/m²의 열유속이 발생하고, 암반이 72.5°C로 히팅된 경우에는 평균 5 W/m²의 열유속이 발생하는 것으로 분석되었다. 위의 결과로부터 열저장공동의 초기와 장기 운영단계에서는 이격거리가 열손실 발생에 미치는 영향이 거의 없으며, 저장공동의 장기 운영시 암반 히팅으로 인해 외부로의 열손실이 현저히 감소함을 알 수 있다.

한편 지상의 열저장소의 경우 단열시스템을 적용하더

Fig. 8. Heat fluxes for different separation distances when the surrounding rock was not heated and heated at 72.5°C (R_{d-w} = Separation-distance-to-cavern-width ratio)

(a) Aboveground TES tanks

(b) Underground TES caverns

Fig. 9. Schematic representation of the heat losses from aboveground TES tanks and underground TES caverns

라도 외부로의 열손실이 발생하게 되며, 장기 운영시 주변 암반의 히팅으로 인해 열손실이 시간경과에 따라 감소하는 지하 저장소와는 달리, 지상 저장소는 외부 대기로의 열손실이 시간에 따라 일정하게 유지되기 때문에 장기 운영에 따른 열손실의 감소를 기대하기 어렵다(Fig. 9). 특히 지상 저장소는 외부 대기온도, 풍속, 풍

향 등의 기후조건의 영향도 크게 받으므로 열손실 측면에서는 지상 저장소보다는 지하 저장소가 장기적으로 더 유리하다고 할 수 있다.

3.3 이격거리별 암반의 히팅 특성 및 열적 성능에 미치는 영향

3.1절과 3.2절에서 언급한대로 주변 암반이 히팅되지 않은 초기 운영단계와 암반이 열적 정상상태에 도달한 장기 운영단계에서는 다중 암반공동의 이격거리가 공동의 열적 성능(열충축화와 열손실)에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다. 그러나 앞서 분석된 장기 운영단계의 열적 성능은 저장공동 주변 암반의 열적 거동(암반 내 열전달)이 정상상태에 도달했을 때의 결과로써, 암반이 열적 정상상태에 도달하기 이전, 즉 초기와 장기 운영단계 사이의 열적 성능을 이격거리별로 검토할 필요가 있다. 이는 다중 암반공동의 이격거리가 가까울수록 공동 주변 암반의 거동이 열적으로 상호 간섭하게 되고, 이로 인해 암반이 열적 정상상태에 도달하는 데 걸리는 시간이 짧아져 열적 성능 측면에서 유리할 수 있기 때문이다. 공동간 이격거리 감소에 따른 주변 암반의 열적 상호 간섭은 앞서 Fig. 4의 장기 운영단계에서의 이격거리별 온도분포에서 확인할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 이격거리가 가까운 경우 두 개 저장공동 사이의 암반 온도가 그렇지 않은 경우에 비해 더 높게 상승하는 중첩효과가 발생하였다.

저장공동의 운영시간 경과에 따른 주변 암반의 히팅 특성과 공동의 열적 성능 변화를 살펴보기 위해 공동 내 물의 온도를 72.5°C(저장공동을 운영함에 따라 주변 암반이 장기적으로 노출되는 물의 온도, 2.2.2절 참조)로 일정하게 유지시킨 상태에서 시간경과에 따른 주변 암반의 온도 변화와 공동 외부로의 열손실 발생 경향을 분석하였다. Fig. 10은 다중 암반공동 사이의 필라부 중심을 가로지르는 수평선을 따라 측정된 시간경과에 따른 암반의 온도분포를 나타낸다. 그림으로부터 이격거리 조건에 관계없이 운영시간이 증가함에 따라 필라부 암반의 온도가 점차적으로 상승하고, 열적 정상상태의 온도분포에 근접해 가는 것을 볼 수 있다. 또한 이격거리가 가까울수록 열적 정상상태의 온도분포에 도달하는 시간이 더 짧아지는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 시간경과에 따른 저장공동 벽면부의 단위 면적당 열손실(열유속)을 나타내는 그림으로, “single cavern”으로 표시된 점선은 단일 저장공동만 설치했을 때의 열유속 발생 경향을 나타내고, “steady state”로 표시된 점선은 다중 저장공동 주변의 암반이 열적 정상상태에 도달한 경우의 열유속 값(5 W/m^2 = Fig. 8의 암반이 72.5°C로 히팅

(a) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 1.03

(b) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 2.07

(c) Separation-distance-to-cavern-width ratio = 3.10

Fig. 10. Temperature variations with time along the horizontal line crossing the center of the pillar between the twin tunnel-shaped caverns

된 경우의 평균 열유속)을 나타낸다. 그림으로부터 공동간 이격거리가 가까울수록 열적 정상상태에서의 열

Fig. 11. Heat fluxes with time for different separation distances (R_{d-w} = separation-distance-to-cavern-width ratio)

유속 값으로 더 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 이격거리가 증가함에 따라 단일 공동만 설치했을 때의 열유속 값으로 근접해 가는 것을 볼 수 있는데, 이는 이격거리가 커질수록 암반 내 열적 거동에 대한 상호 간섭의 영향이 줄어들어 나타난 결과로 판단된다.

위의 분석으로부터 다중 암반공동의 이격거리가 감소함에 따라 공동 사이의 암반이 열적 정상상태에 더 빠르게 도달하고, 이로 인해 저장공동 외부로의 열손실이 주변 암반의 열적 정상상태 조건에서의 열손실 값으로 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 다중 암반공동의 이격거리가 가까울수록 주변 암반의 히팅과 열손실의 감소가 빠르게 진행되어 열적 성능 측면에서 유리함을 나타낸다.

한편 저장공동 내 열에너지에 의한 주변 암반의 히팅 시 열-역학적 상호 작용으로 인해 암반의 강도가 저하되어 저장공동의 역학적 안정성이 감소할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 100℃ 미만의 열에너지 저장을 대상으로 하고 있어 열-역학적 상호 작용으로 인한 영향이 크지 않을 것으로 판단된다. 참고로 익산 화강암, 충주 백운석, 천안 석영섬록암의 온도에 따른 강도 특성을 분석한 Lee & Lee(1996)에 따르면, 100℃ 조건에서의 일축압축강도, 인장강도, 점착력이 상온(room temperature) 조건에서의 값들에 비해 각각 6.6-7.6%, 4.2-9.6%, 5.1-8.9% 감소하는 것으로 나타나 강도저하가 크지 않은 것으로 검토되었다.

3.4 결과 고찰

다중 암반공동의 이격거리별 열적 성능을 분석한 결과, 주변 암반이 히팅되지 않은 초기 운영단계와 암반이 열적 정상상태에 도달한 장기 운영단계에서는 다중

Fig. 12. Total energy losses per unit area during an operational period of 50 years for different separation distances (R_{d-w} = separation-distance-to-cavern-width ratio)

암반공동의 이격거리가 공동의 열적 성능에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 검토되었다. 그러나 이격거리 감소에 따라 공동 사이의 암반이 열적 정상상태에 도달하는 시간이 단축되고, 외부로의 열손실이 열적 정상상태에서의 열손실 값으로 빠르게 수렴하는 것으로 분석되었다. 이러한 열적 정상상태에 도달하는 시간의 단축은 다중 암반공동의 이격거리를 감소시킴으로써 주변 암반의 히팅에 소요되는 비용, 즉 열저장 시스템의 운영비용을 줄일 수 있음을 나타낸다. Fig. 12는 저장공동의 운영을 시작한 후 50년 동안 발생한 공동 벽면부의 단위 면적당 총 에너지 손실을 나타내는 그림으로, Fig. 11의 이격거리별 열유속을 시간에 대해 적분하여 얻은 결과이며, 계산된 총 에너지 손실은 암반의 히팅에 소요되는 비용과 직접 관련된다. Fig. 12로부터 공동간 이격거리가 감소함에 따라 총 에너지 손실(암반의 히팅 비용)이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이격거리가 멀어질수록 단일 저장공동만 설치했을 때의 에너지 손실 값으로 근접해 가는 것을 볼 수 있다.

한편 다중 열저장공동의 이격거리별 공동의 굴착 안정성을 분석한 Park 외(2014)에 따르면, 이격거리 감소에 따라 공동의 파괴확률이 증가, 즉 굴착 안정성이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 공동간 이격거리가 감소함에 따라 굴착 안정성 확보를 위한 공동의 지보(support) 및 보강에 소요되는 건설비용이 증가할 수 있음을 의미한다. 이러한 경향은 위의 이격거리 감소에 따른 암반의 히팅 비용의 감소와는 상반된 것으로서, 다중 열저장공동 계획시 이격거리에 따른 건설비용과 운영비용에 대한 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구와 Park 외(2014)의 연구 결과를 토대로 다중

Fig. 13. Variations in construction cost (C_{const}) and operating cost ($C_{operating}$) when the separation distance between multiple TES caverns is reduced

열저장공동의 이격거리에 따른 암반의 히팅 비용과 공동의 지보 비용의 변화를 Fig. 13과 같이 예상할 수 있다. 즉 저장공동간 이격거리가 감소함에 따라 공동 사이의 암반 거동이 열적 및 역학적으로 상호 간섭하게 되는데, 열적 상호 간섭은 암반 히팅 비용의 감소에 기여하고, 역학적 상호 간섭은 공동의 지보 비용의 증가로 이어질 것이다. Fig. 13(a)와 같이 공동간 이격거리가 D_{sp1} 에서 D_{sp2} 로 줄어들 때 암반 히팅 비용의 감소액이 공동 지보 비용의 증가액보다 큰 경우에는 저장공동의 지보량이 늘어나더라도 이격거리를 감소시켜 열저장 시스템의 운영비용을 줄일 필요가 있을 것이다. 그러나 이와 반대로 Fig. 13(b)와 같이 공동 지보 비용의 증가액이 암반 히팅 비용의 감소액보다 큰 경우에는 이격거리를 감소시키지 않는 것이 경제성 측면에서 유리할 것이다.

위의 예와 같이 다중 열저장공동의 이격거리에 따라

저장공동의 건설과 운영에 소요되는 총 비용이 달라질 수 있으므로 이를 고려한 경제성 분석이 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하 열에너지 저장을 위한 다중 암반 공동의 이격거리에 따른 열성증화 거동, 외부로의 열손실, 운영시간 경과에 따른 주변 암반의 히팅 특성을 수치해석적으로 검토하였고, 수치해석으로부터 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

주변 암반이 히팅되지 않은 저장공동의 초기 운영단계와 암반이 열적 정상상태에 도달한 장기 운영단계에서는 다중 암반공동의 이격거리에 따른 열적 성능의 차이가 거의 없는 것으로 분석되었다. 그러나 이격거리가 감소함에 따라 다중 공동 사이의 암반이 열적 정상상태에 더 빠르게 도달하고, 이로 인해 외부로의 열손실이 열적 정상상태 조건에서 발생한 열손실 값으로 더 빠르게 수렴하는 경향이 나타났다. 이로부터 다중 암반공동의 이격거리를 감소시킴으로써 주변 암반의 히팅에 소요되는 운영비용을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 다중 암반공동의 이격거리가 가까울수록 공동의 구조 안정성이 저하되고, 이는 공동의 지보와 관련된 건설비용의 증가로 이어질 수 있어 다중 암반공동의 이격거리 결정시 공동의 구조 성능과 열적 성능에 대한 비용 분석이 필요한 것으로 검토되었다.

한편 본 연구에서는 운영시간 경과에 따른 주변 암반의 온도분포와 외부로의 열손실을 저장공동 내 열에너지 지를 평균 저장온도로 일정하게 유지시킨 조건에서 분석하였으나, 이는 해석상 편의를 위한 것으로써 저장공동의 실제적인 운영 스케줄을 고려한 분석이 향후 필요할 것으로 판단된다. 즉 열에너지의 주입 및 생산 주기, 열에너지를 공동 내에 저장한 상태로 두는 대기모드 시간을 고려한 열적 성능 평가가 수행되어야 할 것이다.

사 사

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

Reference

1. ANSYS, 2014, FLUENT software, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, <http://www.ansys.com/Products/Simulation+>

- Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent, accessed on April 9, 2014.
2. Cho C.H., J. Urquidi and G.W. Robinson, 1999a, Molecular-level description of temperature and pressure effects on the viscosity of water, *Journal of Chemical Physics* 111.22, 10171-10176.
 3. Cho C.H., J. Urquidi, S. Singh and G.W. Robinson, 1999b, Thermal offset viscosities of liquid H₂O, D₂O, T₂O, *Journal of Physical Chemistry B* 103.11, 1991-1994.
 4. Johari G.P., A. Hallbrucker and E. Mayer, 1996, Two calorimetrically distinct states of liquid water below 150 Kelvin, *Science* 273.5271, 90-92.
 5. Joo H.J., J.B. Jung and H.Y. Kwak, 2008, Numerical study on thermal stratification of the aspect ratio of solar thermal storage tank, *Proceedings of the Korean Solar Energy Society (2008) Fall Conference*, 178-183.
 6. KDHC (Korea District Heating Corporation), 2013, Simulator for estimating heating cost, <http://www.kdhc.co.kr>, accessed on February 26, 2013.
 7. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012, Development of core technology for underground thermal energy storage in rock cavern, Research report GP2011-003-2012(1) Part. III, Ministry of Knowledge Economy, Seoul.
 8. KMA (Korea Meteorological Administration), 2011, Climatological normals of Korea (1980-2010), KMA, Seoul.
 9. Lee, H.W. and C.I. Lee, 1996, A study on temperature dependency of strength and deformation behavior of rocks, *Tunnel & Underground Space* 6.2, 101-121.
 10. Lide D.R., 1990, *CRC handbook of chemistry and physics*, CRC Press, Florida.
 11. Park, D., Kim, H.M., Ryu, D.W., Choi, B.H., Sunwoo, C. and K.C. Han, 2012, Numerical study on the thermal stratification behavior in underground rock cavern for thermal energy storage (TES), *Tunnel & Underground Space* 22.3, 188-195.
 12. Park, D., Ryu, D.W., Choi, B.H., Sunwoo, C. and K.C. Han, 2013, Thermal stratification and heat loss in underground thermal storage caverns with different aspect ratios and storage volumes, *Tunnel & Underground Space* 23.1, 308-318.
 13. Park, D., Kim, H., Park, J.W., Park, E.S. and C. Sunwoo, 2014, Analysis of the optimal separation distance between multiple thermal energy storage (TES) caverns based on probabilistic analysis, *Tunnel & Underground Space* 24.2, 155-165.
 14. Shyu R.J., J.Y. Lin and L.J. Fang, 1989, Thermal analysis of stratified storage tanks, *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 111.1, 54-61.
 15. Song Y., 2008, Discussion on assessment and competitiveness of the geothermal resources, *Journal of the Korean Society for Geosystem* 45.4, 293-304.
 16. Takakura T., 1989, Technical models of the greenhouse environment, *Acta Horticulture* 248, 49-54.
 17. XYdatasource.com, 2012, Liquid thermal conductivity of water vs. temperature, <http://www.xydatasource.com/xy-showdatasetpage.php?datasetcode=8888&dsid=109>, accessed on March 30, 2012.

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

선우준

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

박의섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원