

## 지하 열저장 공동의 종횡비와 저장용량에 따른 열성층화 및 열손실

박도현, 류동우\*, 최병희, 선우춘, 한공창

## Thermal Stratification and Heat Loss in Underground Thermal Storage Caverns with Different Aspect Ratios and Storage Volumes

Dohyun Park, Dong-Woo Ryu\*, Byung-Hee Choi, Choon Sunwoo, Kong-Chang Han

**Abstract** Thermal stratification in heat stores is essential to improve the efficiency of energy storage systems and deliver more useful energy on demand. It is generally well known that the degree of thermal stratification in heat stores varies depending on the aspect ratio (the height-to-width ratio) and size of the stores. The present study aims to investigate the effect of the aspect ratio and storage volume of rock caverns for storing hot water on thermal stratification in the caverns and heat loss to the surroundings. Heat transfer simulations using a computational fluid dynamics code, FLUENT were performed at different aspect ratios and storage volumes of rock caverns. The variation of thermal stratification with respect to time was examined using an index to quantify the degree of stratification, and the heat loss to the surroundings was evaluated. The results of the numerical simulations demonstrated that the thermal stratification in rock caverns was improved by increasing the aspect ratio, but this effect was not remarkable beyond an aspect ratio of 3-4. When the storage volume of rock caverns was large, a higher thermal stratification was maintained for a relatively longer time compared to caverns with a small storage volume, but the difference in thermal stratification between the two cases tended to decrease as the aspect ratio became larger. In addition, the numerical results showed that the heat loss to the surrounding rock tended to increase with an increase in aspect ratio because the surface area of rock caverns increased as the aspect ratio became larger. The total heat loss from multiple small caverns with a reduced storage volume per cavern was larger compared to a single cavern with the same total storage volume as that of the multiple caverns.

**Key words** Cavern thermal energy storage, Thermal stratification, Degree of thermal stratification, Aspect ratio, Heat loss

**초 록** 열저장소 내 열성층화는 에너지저장 시스템의 효율을 향상시키고 수요 발생시 더 많은 유효에너지를 공급하기 위해 필수적인 기술이다. 일반적으로 저장소의 종횡비(폭에 대한 높이의 비)와 크기에 따라 열성층도가 달라지는 것으로 알려져 있다. 본 논문은 열수 저장을 위한 암반공동의 종횡비와 저장용량이 저장공동 내 열성층화와 외부로의 열손실에 미치는 영향을 조사하는 데 연구 목적이 있다. 이를 위해 전산유체역학 코드인 FLUENT를 이용하여 암반공동의 종횡비와 저장용량에 따른 열전달 시뮬레이션을 수행하였다. 성층도 정량화 지수를 이용하여 시간경과에 따른 열성층화의 변화를 분석하였으며, 저장공동 외부로의 열손실을 평가하였다. 분석 결과, 종횡비가 증가함에 따라 공동 내 열성층화가 향상되는 경향을 보였으나, 종횡비 3-4 이상부터는 이러한 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다. 저장용량이 작은 암반공동에 비해 용량이 큰 암반공동에서 상대적으로 긴 시간 동안 열성층화가 높게 유지되는 것으로 분석되었으나, 종횡비 증가에 따라 저장용량이 다른 공동들간의 성층화 차이가 줄어드는 경향을 나타냈다. 암반공동의 종횡비가 커질수록 공동의 표면적이 늘어나 종횡비의 증가에 따라 주변 암반으로의 열손실이 증가하는 경향을 보였으며, 단위 저장용량을 줄여 소규모 다중공동을 적용하는 경우, 총 저장용량이 동일한 단일공동에 비해 전체 열손실량이 증가하는 것으로 분석되었다.

**핵심어** 암반공동 열에너지 저장, 열성층화, 열성층도, 종횡비, 열손실

**Received:** Aug. 12, 2013

**Revised:** Aug. 27, 2013

**Accepted:** Aug. 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. 서론

열에너지 저장을 위한 유체의 열성층화(thermal stratification)는 이용가능한 유효에너지(available energy or

exergy)를 증대시켜 열저장 시스템의 에너지 이용효율을 향상시키기 위한 필수적인 기술이다. 열성층화의 기본 원리는 열적 부력(thermal buoyancy)을 이용하여 고온과 저온 에너지의 혼합(mixing)을 줄여 열에너지의 성층화를 유지하는 것이다. 즉 열에너지 주입시 고온의 유체는 밀도가 낮아 상부로 이동하고 온도가 낮은 유체는 고온의 유체에 비해 상대적으로 밀도가 높아 아래쪽으로 이동하므로 저장된 유체는 온도에 따라 층을 이룰 수 있다. 열에너지 저장소 내부와 외부의 열교환이 없는 경우, 고온의 가벼운 유체는 상부에 있고 저온의 무거운 유체는 하부에 있으므로 열의 대류(heat convection)는 발생하지 않고, 온도층간의 열전도(heat conduction)만 발생하게 된다.

저장소 내 유체의 열성층도(degree of thermal stratification) 감소는 (1) 저장소 외부로의 열손실, (2) 에너지의 주입 및 배출시 유체흐름에 의한 강제 대류(forced convection), (3) 온도층간의 열전도, (4) 저장소 벽면에서의 열전도에 의한 벽면 주위 유체의 자연 대류(natural convection)에 의해 발생한다(Fig. 1). 따라서 열성층도의 감소는 유체 주입구의 형상, 유체의 주입 및 배출 속도, 저장소 형상의 종횡비(aspect ratio) 및 저장소 재질 등에 의해 영향을 받는다(Park 외, 2012).

저장소의 설계에 있어서 가장 우선적으로 결정되어야 하는 것은 저장소의 용량 및 형상으로서 저장소의 높이와 지름(폭) 등의 규격을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 일반적으로 저장소의 종횡비(높이/폭)가 커질수록 열성층화가 높게 유지되는 것으로 알려져 있다(Joo 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. Joo 외(2008)의 경우 수치해석적 연구를 통해 태양열에 의한 고온수 저장시 저장소의 종횡비를 2 이상으로 설계하는 것이 열성층화에 있어 유리하다고 제안하였다. 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 종횡비별 열성층화 효율을 분석한 KIGAM(2012)의 연구에서는 토러스형 암반공동의 경우 열적 성능 측면에서 유리한 최적 종횡비가 3.5인 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 CFD(computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 통해 지하 열수(hot water) 저장을 위한 암반공동의 종횡비와 저장용량이 공동 내 열성층화와 저장공간 외부로의 열손실에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 스웨덴의 열수저장 암반공동에 대해 열성층화 효율을 분석한 KIGAM(2012)의 연구와 달리, 본 연구에서는 국내 주거지역의 열수(열교환용 난방수와 직접사용 급탕수) 공급을 위한 지하 저장공동을 대상으로 하였으며, 저장용량에 따른 열적 거동의 변화를 추가로 조사하였다.

## 2. 열전달 해석을 위한 수치 모델링

### 2.1 입력 물성치

본 연구에서는 사일로형 암반공동의 열적 거동을 분석하기 위해 CFD 수치해석 프로그램인 FLUENT (ANSYS, 2012)를 이용하여 열전달 해석(heat transfer analysis)을 수행하였다. 열에너지 저장을 위한 물의 열적 특성에 대한 기존의 연구 자료를 토대로 Fig. 2와 같이 온도에 따른 물의 열물성(밀도, 비열, 열전도도, 점성) 변화를 고려하였다. 암석의 물성(밀도, 비열, 열전도도)은 KIGAM(2012)의 국내 황등 화강암과 단양 석회석에 대한 실내시험 자료를 적용하였다(Table 1).

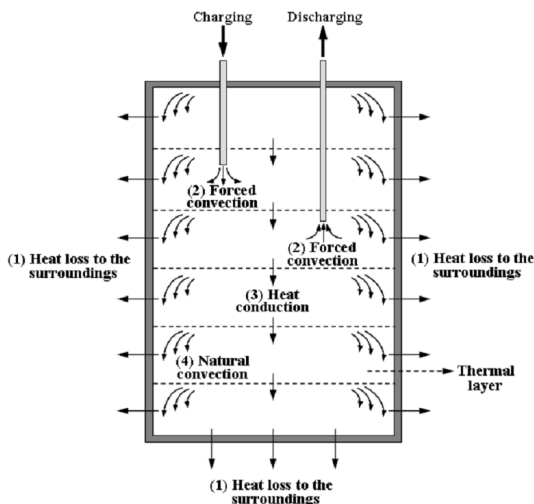


Fig. 1. Factors influencing thermal stratification

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

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (kJ/m <sup>3</sup> ·K)	Heat conductivity (W/m·K)
2,680	2,310	3.0

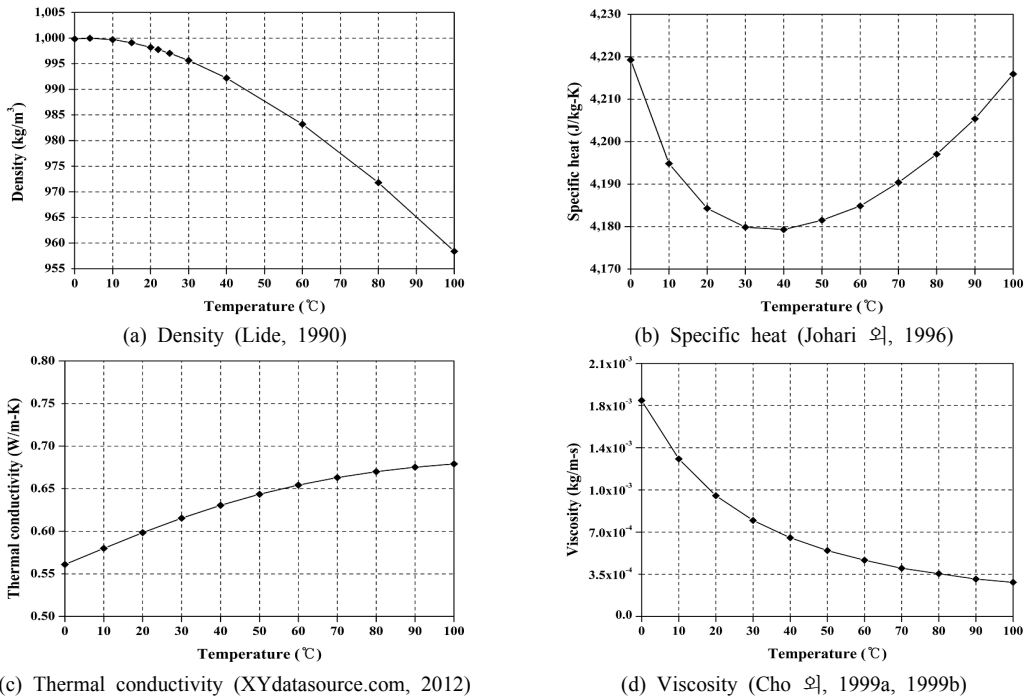


Fig. 2. Thermal properties of water with respect to temperature

Table 2. Dimensions of the silo-shaped rock caverns for different aspect ratios

Storage volume = 84,000 m <sup>3</sup>			Storage volume = 42,000 m <sup>3</sup>		
W, Width (m)	H, Height (m)	Aspect ratio	W, Width (m)	H, Height (m)	Aspect ratio
47.0	48.5	1.03	38.0	37.0	0.97
38.0	74.0	1.95	30.0	59.5	1.98
33.0	98.0	2.97	26.0	79.0	3.04
30.0	119.0	3.97	24.0	93.0	3.88
28.0	136.5	4.88	22.0	110.5	5.02
26.0	158.0	6.08	20.5	127.0	6.20

2.2 암반공동의 종횡비별 형상 제원

본 연구에서는 Park 외(2013)가 산정한 암반공동의 저장용량을 토대로 공동의 형상 제원을 설정하였다. Park 외(2013)의 연구에서는 국내 아파트 1개 단지(1,000세대)에 대해 2개월 동안 열수 공급이 가능하도록 설계 저장용량(84,000 m<sup>3</sup>)을 산정하였다. 본 연구에서 고려한 암반공동의 종횡비는 약 1-6의 범위이었고, 공동의 저장용량 변화에 따른 영향을 분석하기 위해 설계 저장용량의 절반 부피(42,000 m<sup>3</sup>)를 갖는 사일로형 암반공동에 대해서도 열전달 해석을 수행하였다. 저장용량이 84,000 m<sup>3</sup>과 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동의 종횡비별 형상 제원은 Table 2와 같으며, 저장공동의 종횡비가 증가함

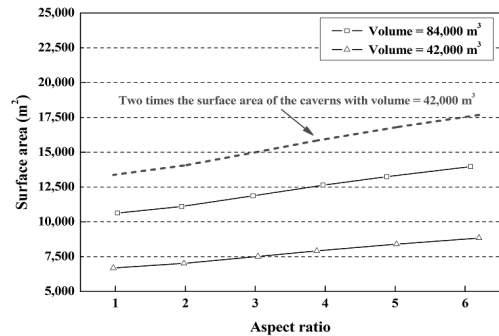


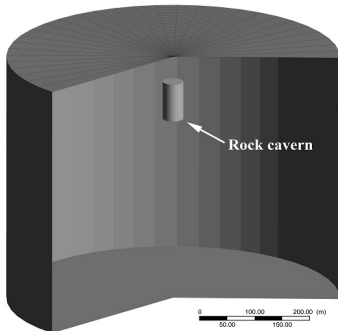
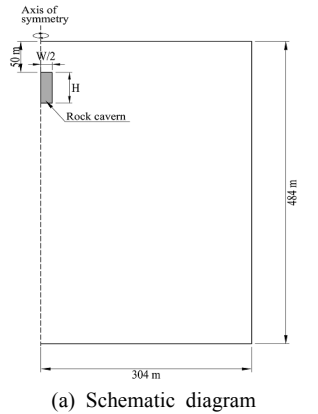
Fig. 3. Surface areas of the two caverns for different aspect ratios

에 따라 Fig. 3과 같이 공동의 표면적(surface area)이 증가하는 경향을 보였다. Fig. 3에 표시된 점선은 저장용량 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동 표면적의 두 배를 나타내는 것으로서, 실제 저장용량(84,000 m<sup>3</sup>)을 절반으로 분할하여 암반공동 두 개를 설치하는 경우 단일공동에 비해 표면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 표면적은 원통형 암반공동의 표면적이므로 원통 상하부의 원의 면적과 원통 측면의 표면적의 합을 나타낸다.

**2.3 수치 모델링 및 해석 조건**

본 연구에서 고려한 암반공동은 사일로 형상으로 Fig. 4와 같이 축대칭(axial symmetry) 조건을 사용하여 수치모델링을 하였다. 해석 영역의 반경은 304 m, 높이는 484 m이었으며, 공동의 설치 심도는 지표면-공동 천단부 거리 기준으로 50 m로 설정하였다. Fig. 5는 저장용량이 84,000 m<sup>3</sup>이고 종횡비가 1.95인 경우의 해석 메쉬를 나타낸다.

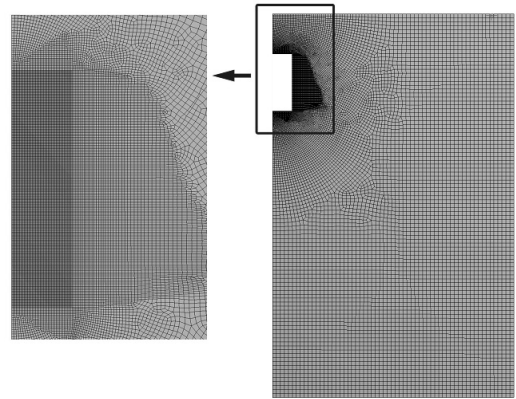
시간경과에 따른 열에너지의 온도 변화를 분석하기



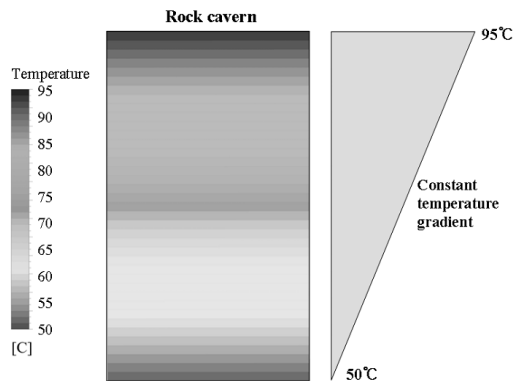
**Fig. 4.** Numerical modeling using axial symmetry (W and H = width and height of the cavern, respectively, which are indicated in Table 2).

위해 비정상상태(transient state) 해석을 수행하였으며 고려한 총 해석시간은 10일이었다. 본 연구에서는 FLUENT의 solid 조건을 이용하여 주변 암반을 모델링하였고, 주변 암반을 불투수층으로 가정하여 암반 내 지하수의 영향을 고려하지 않았다. 공동 내 저장되는 물과 주변 암반 사이에 형성되는 wall의 경계에는 coupled 조건을 적용하여 유체와 고체간의 열전달이 가능하도록 하였다.

주변 암반의 초기 온도는 Table 3의 기상청 자료(KMA, 2011)를 토대로 19°C로 설정하였다. 암반의 초기 온도(19°C)는 Table 3의 지하 5 m 심도의 전국 땅속 온도의 평균값(15.3°C)과 Table 2의 암반공동들의 바닥부와 지표면 사이의 평균 거리 약 150 m를 고려한 온도이다(국내 평균 지온 증가율 25°C/km(Song, 2008)를 적용함). 지표면에는 자연대류 열전달 계수(free-convective heat transfer coefficient) 9 W/m<sup>2</sup>-K와 대기 온도



**Fig. 5.** Numerical mesh (storage volume = 84,000 m<sup>3</sup>, aspect ratio = 1.95)



**Fig. 6.** Initial temperature distribution of stored water assumed in the present study

**Table 3.** Underground soil temperature at a depth of 5 m (KMA, 2011)

Station	Year 2011												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Avg.
Sokcho	13.9	12.6	11.2	10.2	10.1	10.7	11.9	13.5	15.7	16.4	16.4	15.6	13.18
Chuncheon	16.7	15.8	15.1	14.5	14.2	14.1	14.7	15.9	17.1	17.8	17.9	17.5	15.94
Gangneung	15.3	14.1	12.9	12.2	12	12.4	13.3	14.5	16	16.7	16.8	16.3	14.38
Seoul	15.8	14.5	13.4	12.5	12.3	12.8	14.1	15.8	17.1	17.7	17.6	17	15.05
Incheon	15.5	14.4	13.4	12.8	12.6	13	14	15.2	16.4	16.9	16.9	16.4	14.79
Ulleungdo	14.5	14	13.1	12.4	12.1	11.9	12.1	12.7	13.4	14.2	14.7	14.8	13.33
Suwon	15.4	14.4	13.4	12.6	12.3	12.4	13.1	14.1	15.3	16.2	16.5	16.2	14.33
Uljin	14.7	13.5	12.4	11.9	11.8	12.3	13.1	14.2	15.4	16.2	16.3	15.8	13.97
Cheongju	15.8	14.8	13.9	13.1	12.8	12.9	13.6	14.8	16.1	16.8	17	16.6	14.85
Daejon	17	15.9	14.8	14.1	13.8	14.2	15.1	16.5	17.9	18.6	18.7	18.3	16.24
Pohang	17.5	16.6	15.6	15	14.9	15.2	15.8	16.7	17.5	18.2	18.4	18.2	16.63
Daegu	15.4	14.3	13.4	12.9	13.2	13.8	14.9	16.1	17.2	17.6	17.4	16.7	15.24
Jeonju	15.6	14.4	13.4	12.7	12.7	13.2	14.4	15.7	16.6	17	17.1	16.6	14.95
Busan	17.3	16.4	15.5	14.8	14.6	14.8	15.6	16.6	17.6	18.2	18.4	18.1	16.49
Mokpo	16.5	15.1	14.2	13.8	14.2	15.2	16.5	18	19.2	19.6	19.2	18.2	16.64
Yoesu	17.6	16.8	16	15.1	14.8	14.8	15.4	16.3	17.3	18	18.3	18.1	16.54
Jeju	18.4	17.6	16.6	15.7	15.4	16	17.6	19.5	20.4	20.3	19.7	19.1	18.03
Jinju	16.2	15.7	15	14.4	13.9	13.8	14.2	15	15.8	16.6	17	17	15.38

(ambient temperature) 25°C인 대류 경계조건을 적용하여 지표면과 대기의 열교환을 고려하였다. 위의 자연대류 열전달 계수는 Takakura(1989)가 제안한 식 (1)을 토대로 산정되었다.

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

여기서  $h_c$ 는 지표면에서의 자연대류 열전달 계수 ( $W/m^2-K$ ),  $dT$ 는 지표면과 대기의 온도 차이(K)를 나타낸다.

본 연구에서는 국내 주거지역에 열수(열교환용 난방수와 직접사용 급탕수)를 공급하기 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 설정하였으며, 저장온도 범위의 하한값(50°C)은

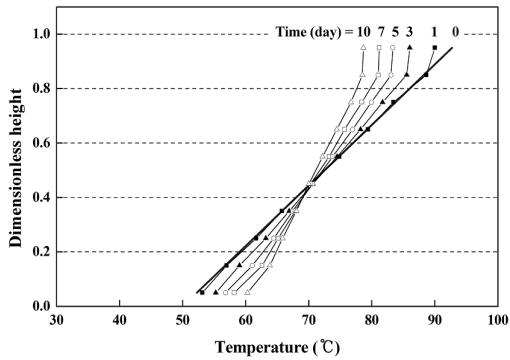
열에너지 저장 후 외부로의 열손실을 고려하여 사용온도 범위의 하한값인 45°C에 5°C를 추가한 온도이다. 열전달 해석을 위한 저장공동 내 초기 온도 분포는 Fig. 6과 같이 공동의 바닥부에서부터 천정부까지 일정한 온도구배(temperature gradient)를 갖는 열성층화 상태를 가정하였다.

### 3. 종횡비 및 저장용량에 따른 열적 거동 분석 결과

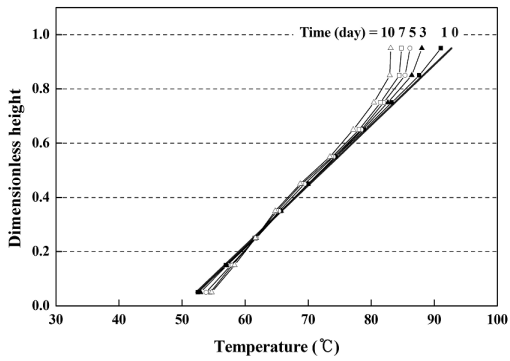
#### 3.1 종횡비 및 저장용량별 열성층화 거동

저장용량 84,000 m<sup>3</sup>과 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동 내 열수 저장 후, 시간경과에 따른 물의 온도 변화는 각각 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 그림에서 무차원 높이(dimensionless height)는 저장공동 바닥부 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.

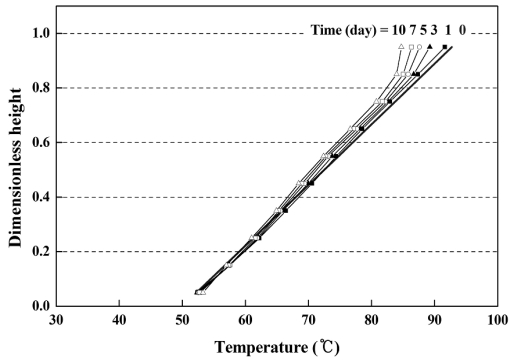
Fig. 7과 Fig. 8에 표시된 시간은 열에너지 저장 후 경과한 시간, 즉 대기 운영모드(standby mode of operation)



(a) Aspect ratio = 1.03



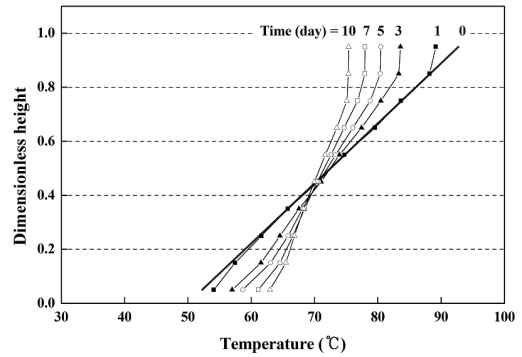
(b) Aspect ratio = 1.95



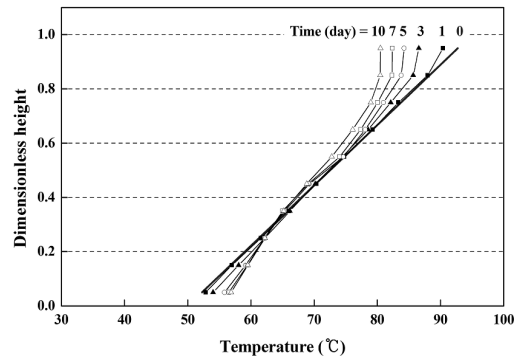
(c) Aspect ratio = 2.97

**Fig. 7.** Temperature variation of stored water with time (storage volume = 84,000 m<sup>3</sup>)

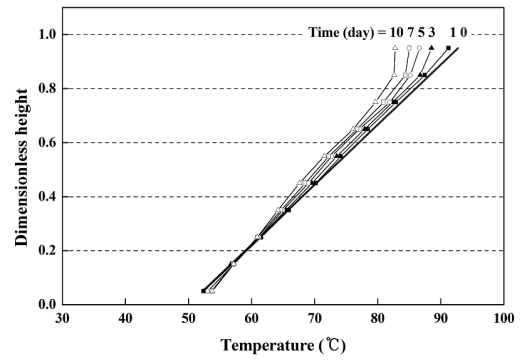
시간을 의미하며, 시간 = 0에서의 실선은 본 연구에서 가정한 초기 열성층화 상태(Fig. 6 참조)를 나타낸다. 실선으로부터 편차가 커질수록 열성층화가 감소하는 것을 의미하며, 특정 무차원 높이에서 온도는 해당 높이의 수평선을 따라 측정된 열에너지의 온도 평균값을 나타낸다. Fig. 7과 Fig. 8로부터 종횡비와 관계없이 시간경과에 따른 열성층화의 점차적인 감소, 즉 초기 열성층화시 온도분포와의 편차가 점차 크게 발생하는 것



(a) Aspect ratio = 0.97



(b) Aspect ratio = 1.98



(c) Aspect ratio = 3.04

**Fig. 8.** Temperature variation of stored water with time (storage volume = 42,000 m<sup>3</sup>)

을 알 수 있으며, 이러한 편차는 저장용량이 작은 경우에 더 크게 발생하였다. 그러나 저장공동의 종횡비가 증가함에 따라 열성층화의 감소가 줄어드는 경향을 보여 열에너지 저장공동의 형상 결정시 종횡비가 주요 설계인자인 것을 확인할 수 있었다.

위와 같이 도해적 방법에 의해 분석된 시간경과에 따른 열성층화의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 Shyu 외(1989)가 제안한 변온층 구배법(thermocline gradient

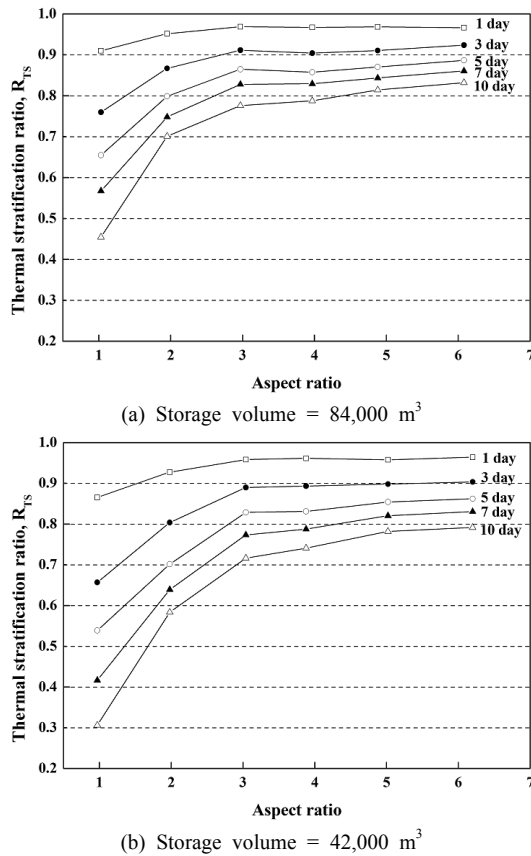


Fig. 9. Thermal stratification ratios at different aspect ratios when the storage volumes of the caverns were 84,000 and 42,000 m<sup>3</sup>

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 열성층도를 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 암반공동의 종횡비별 열성층화 비를 분

석한 결과는 Fig. 9와 같다. 그림으로부터 저장용량에 관계없이 종횡비가 커질수록 열성층화 비가 높게 유지되고, 시간경과에 따라 열성층화 비가 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

저장용량 84,000 m<sup>3</sup>인 암반공동의 열에너지 저장 후 대기 운영모드 시간과 종횡비별 열성층화 거동은 다음과 같다. 대기모드 시간이 1일인 경우, 종횡비가 3보다 커짐에 따라 열성층화가 향상되지 않고 수렴하는 경향을 나타냈으며, 대기모드 시간이 3-7일인 경우, 종횡비 3-4 이상부터는 열성층화 비가 크게 증가하지 않았다. 대기모드 시간이 10일인 경우에는 종횡비의 증가에 따라 열성층화가 높게 유지되는 경향을 보였으나, 종횡비 3 이상부터는 열성층화 비의 증가가 크지 않았다. 저장용량 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동의 종횡비별 열성층화 거동을 살펴보면 다음과 같다. 대기모드 시간이 1-3일인 경우, 종횡비 3 이상부터는 열성층화 비가 수렴하는 경향을 나타냈다. 대기모드 시간이 5-10일인 경우에는 종횡비가 증가함에 따라 열성층화 비가 높게 유지되는 경향을 보였으나, 종횡비 3-4 이상부터는 열성층화 비의 증가가 크지 않았다. 위의 분석 결과로부터 두 가지 저장용량의 암반공동에 대한 최적 종횡비는 3-4의 범위에 있는 것으로 판단할 수 있다.

한편 Fig. 9로부터 암반공동의 저장용량에 따른 열성층도의 차이를 비교해보면, 유사한 종횡비 조건에서 저장용량이 작을수록 열성층화 비가 상대적으로 낮게 유지되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 저장용량이 큰 공동에 비해 용량이 작은 공동이 열성층화 측면에서 다소 불리하므로 큰 규모의 단일공동을 분할하여 소규모 다중공동을 설계하고자 하는 경우 열성층도의 감소를 고려해야 할 것이다. 그러나 Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 종횡비의 증가에 따라 저장용량이 다른 공동들간의 열성층도 차이가 줄어드는 경향을 보이므로 높은 종횡비를 적용함으로써 열성층화 측면에서 큰 손실이 없는 소규모 다중공동을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 종횡비 및 저장용량별 열손실

종횡비와 저장용량에 따른 암반공동 외부로의 열손실을 분석한 결과는 Fig. 10과 같다. 저장용량 84,000 m<sup>3</sup>인 경우, 종횡비 1.03-6.08에서 821-1,162 kW의 열손실이 발생하고, 저장용량 42,000 m<sup>3</sup>인 경우, 종횡비 0.97-6.20에서 열손실 503-720 kW가 발생하는 것으로 분석되었다. 열손실량은 식 (3)을 이용하여 저장된 물의 초기 온도와 시간경과에 따른 물의 온도 변화를 고려하여 계산되었다.

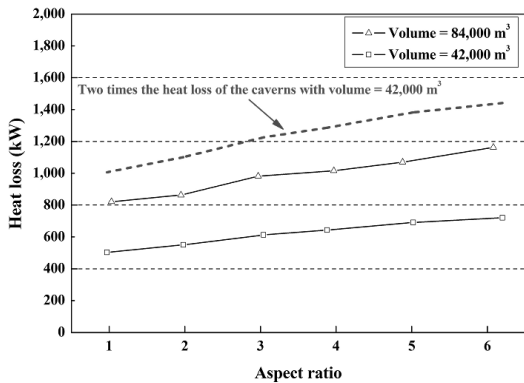


Fig. 10. Heat losses at different aspect ratios when the storage volumes of the caverns were 84,000 and 42,000 m<sup>3</sup>

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (3)$$

여기서  $Q$ 는 열에너지(kJ),  $m$ 은 저장된 열수의 질량(kg),  $C_p$ 는 물의 비열(kJ/(kg·°C)),  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 저장된 물의 초기 온도(°C)와 시간경과 후 저장된 물의 온도(°C)를 나타낸다.

Fig. 10으로부터 저장공동의 종횡비가 증가함에 따라 열손실량이 증가하는 경향을 보이고, 저장용량의 감소에 따라 열손실이 줄어드는 것을 알 수 있다. 저장용량 감소에 따른 열손실의 감소는 Fig. 3에 도시된 대로 저장용량이 줄어들어 따라 외부와의 열교환이 일어나는 공동의 표면적이 감소하여 나타난 결과이다. Fig. 10에 표시된 점선은 저장용량 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동 열손실량의 두 배를 나타내는 것으로서, 설계 저장용량(84,000 m<sup>3</sup>)을 절반으로 분할하여 암반공동 두 개를 설치하는 경우 단일공동에 비해 총 열손실량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 주변 암반과 열교환이 일어나는 저장공동의 표면적 크기와 관련되어 있으며, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 저장용량 42,000 m<sup>3</sup>인 암반공동 두 개의 총 표면적이 단일공동(저장용량 84,000 m<sup>3</sup>)의 표면적에 비해 증가하여 나타난 결과이다.

저장공동이 설치되는 지반조건에 따라 역학적 안정성 확보를 위해 설계 저장용량을 분할하여 소규모의 다중공동을 적용할 필요가 있을 것이다. 그러나 위의 결과와 같이 소규모 다중공동 적용시 총 열손실량이 증가할 수 있으므로 역학적 안정성뿐만 아니라 열적 성능을 종합적으로 고려하여 열저장 암반공동을 설계해야 할 것이다.

한편 종횡비의 증가에 따라 열손실이 증가하므로 본 연구의 결과(Figs. 7-9)와 다르게 종횡비가 커질수록 열성층화가 감소한다고 판단할 수 있으나, 이는 열성층화의 감소에 영향을 미치는 요인들과 함께 이해되어야 한다. 즉 열성층화의 감소는 주변으로의 열손실뿐만 아니라 성층화 상태로 저장된 온도층들간의 열전도에 의해서도 발생한다. 동일한 저장부피에서 종횡비가 커질수록 각 온도층의 두께가 두꺼워지고, 이로 인해 온도층들간의 열전도에 의한 에너지 혼합, 즉 온도 감소가 줄어들게 된다. 따라서 종횡비가 커질수록 열성층도가 높게 유지되는 것은 종횡비 증가로 인해 늘어난 주변으로의 열손실(온도 감소)에 비해 온도층들간의 열전도에 의한 온도 감소가 더 적게 발생한다는 것을 의미한다.

### 3.3 결과 고찰

열에너지 저장을 위한 암반공동의 종횡비가 공동 내 열성층화에 미치는 영향을 분석한 결과, 암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 열성층화가 높게 유지되는 것으로 나타났다. 종횡비 증가에 따른 열성층화의 증가는 Park 외(2013) 연구의 종횡비 증가에 따른 저장공동의 역학적 안정성 감소와 상반되는 것으로서, 열저장 암반공동의 형상 설계시 열적 성능과 역학적 안정성에 대한 분석이 병행되어야 함을 알 수 있으며, 두 가지 분석 결과를 토대로 Fig. 11과 같이 열저장 공동의 최종적인 설계 종횡비를 결정할 수 있을 것이다.

공동의 종횡비별 열손실 발생 경향을 분석한 결과, 종횡비 증가시 주변 암반에 노출되는 공동의 표면적이 증가하여 열손실이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 열손실의 증가는 열저장 공동의 장기 운영을 통해 최소화될 수 있는 것으로 알려져 있다. 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 종횡비별 열손실을 분석한 KIGAM(2012)의 연구에 따르면, 주변 암반의 히팅(heating)이 없는 초기 운영단계에서는 본 연구의 결과와 같이 저장공동의 종횡비 증가에 따라 공동의 표면적이 증가하여 열손실량이 커지는 경향을 나타낸 반면, 장기 운영시 주변 암반이 히팅된 경우에는 초기 운영단계에 비해 열손실량이 크게 줄어들고 저장공동의 종횡비가 열손실 발생에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다(Fig. 12). 따라서 장기 운영을 위한 열저장 암반공동의 건설을 고려할 때, 열손실 측면보다는 열성층화 효율을 우선적으로 고려하여 저장공동의 종횡비를 결정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 다만, 위의 기존 연구결과는 주변 암반의 다양한 온도분포 조건을 고려한 상세 연구를 통해 추가로 확인될 필요가 있을 것이다. 한편, 3.2절에서 언급한대로 설계 저장용량을 분할하여 소규모의 다중공동을 건



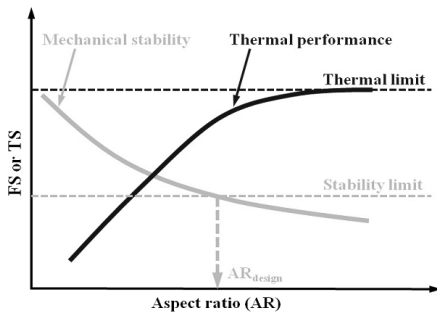


Fig. 11. Mechanical stability and thermal performance vs. aspect ratio (Park 외, 2013). (FS = factor of safety, TS = thermal stratification, and  $AR_{design}$  = designed aspect ratio of a cavern)

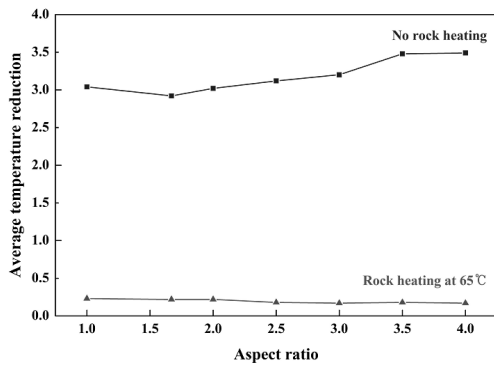


Fig. 12. Heat losses at different aspect ratios of the Lyckebo rock cavern in Sweden (KIGAM, 2012)

설할 경우 총 열손실량이 증가할 수 있으므로 이 경우에는 열성층화뿐만 아니라 열손실 측면도 종합적으로 고려하여 암반공동을 설계해야 할 것이다.

암반공동의 저장용량에 따른 열성층화 거동을 분석한 결과, 동일한 종횡비 조건에서 저장용량이 작은 암반공동보다 용량이 큰 공동에서 열성층도가 더 높게 유지되는 것으로 검토되어 저장용량이 큰 암반공동이 소규모의 공동에 비해 열성층화 측면에서 유리한 것을 알 수 있었다. 그러나 종횡비가 증가함에 따라 저장용량이 다른 공동들간의 열성층도 차이가 감소하므로 높은 종횡비 적용을 통해 열성층화 측면에서 불리하지 않은 소규모 다중공동의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지하 열에너지 저장을 위한 암반공동의 종횡비와 저장용량 변화에 따른 열성층화 거동과 지

장공동 외부로의 열손실을 수치해석적으로 검토하였고, 수치해석으로부터 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

암반공동의 종횡비가 증가함에 따라 열성층화가 높게 유지되는 것으로 분석되었으나, 종횡비 3-4 이상부터는 열성층도가 수렴하거나 크게 증가하지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 고려한 두 가지 저장용량에 대해 유사하게 나타났으며, 이로부터 열적 성능 측면에서 유리한 사일로형 암반공동의 최적 종횡비는 3-4의 범위에 있는 것을 알 수 있었다.

저장용량에 따른 열성층화의 변화를 조사한 결과, 동일한 종횡비 조건에서 저장용량이 작을수록 열성층화가 낮게 유지되는 것으로 나타나 큰 규모의 단일공동을 분할한 소규모 다중공동 설계시 열성층화 측면에서의 손실을 감안해야 하는 것으로 분석되었다. 그러나 높은 종횡비를 적용하는 경우 이러한 손실을 줄일 수 있는 것으로 검토되었다.

전체 저장용량을 분할하여 소규모의 다중공동을 건설할 경우, 동일한 총 저장용량의 단일공동에 비해 열손실량이 증가하는 것으로 분석되어 다중공동 적용시 열성층화 효율과 열손실 측면을 모두 고려할 필요가 있는 것으로 검토되었다.

한편 본 연구에서는 연속체 해석에 기반하여 암반공동 내 열적 거동을 분석하였으나, 암반 내 불연속면을 통한 저장된 열에너지의 외부로의 누출 및 지하수 흐름에 의해 저장공동 내 열적 거동이 달라질 수 있으므로 암반의 불연속 특성을 고려한 열저장 공동의 성능 평가가 향후 이루어져야 할 것이다.

#### 사 사

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

#### References

1. ANSYS, 2012, FLUENT software, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent>, accessed on May 21, 2012.
2. 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.
3. Cho C.H., J. Urquidi and G.W. Robinson, 1999, Molecular-level description of temperature and pressure effects on the viscosity of water, *Journal of Chemical Physics* 111.

- 22, 10171-10176.
4. Cho C.H., J. Urquidi, S. Singh and G.W. Robinson, 1999, Thermal offset viscosities of liquid H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, T<sub>2</sub>O, *Journal of Physical Chemistry B* 103.11, 1991-1994.
  5. Cole R.L. and F.O. Bellinger, 1982, Thermally stratified tanks, *ASHRAE Transactions* 88, 1005-1017.
  6. 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.
  7. 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.
  8. Hahne E. and Y. Chen, 1998, Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores, *Solar Energy* 64, 9-18.
  9. Hariharan K., K. Badrinarayana, S.S. Murthy and M.V. Murthy, 1991, Temperature stratification in hot-water storage tanks, *Energy* 16, 977-982.
  10. 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.
  11. Johari G.P., A. Hallbrucker and E. Mayer, 1996, Two calorimetrically distinct states of liquid water below 150 Kelvin, *Science* 273.5271, 90-92.
  12. 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.
  13. KDHC(Korea District Heating Corporation), 2013, Simulator for estimating heating cost, <http://www.kdhc.co.kr> [Accessed February 26, 2013].
  14. 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.
  15. KMA (Korea Meteorological Administration), 2011, Climatological normals of Korea (1980-2010), KMA, Seoul.
  16. Lide D.R., 1990, CRC handbook of chemistry and physics, CRC Press, Florida.
  17. 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.
  18. 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.
  19. Park D., H.M. Kim, D.W. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo, and K.C. Han, 2012, Technologies of underground thermal energy storage (UTES) and Swedish case for hot water, *Tunnel & Underground Space* 22.1, 1-11.
  20. Park D., D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013, Mechanical stability analysis to determine the optimum aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage, *Tunnel & Underground Space* 23.2, 150-159.
  21. 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.
  22. Song Y., 2008, Discussion on assessment and competitiveness of the geothermal resources, *Journal of the Korean Society for Geosystem* 45.4, 293-304.
  23. Takakura T., 1989, Technical models of the greenhouse environment, *Acta Horticulture* 248, 49-54.
  24. 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 지구환경시  
스템공학부 공학박사

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



### 최병희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
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



### 한공창

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

Tel: 042-868-3241  
E-mail: hankc@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연  
구본부 책임연구원



### 류동우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
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



### 선우춘

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 지구환경연  
구본부 책임연구원