

## 열에너지 저장을 위한 지하 암반공동 내 열성층화 거동에 대한 수치해석적 연구

박도현, 김형목, 류동우\*, 최병희, 선우춘, 한공창

### Numerical Study on the Thermal Stratification Behavior in Underground Rock Cavern for Thermal Energy Storage (TES)

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

**Abstract** Using a computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT, the present study investigated the thermal stratification behavior of Lyckebo storage in Sweden, which is the very first large-scale rock cavern for underground thermal energy storage. Heat transfer analysis was carried out for numerical cases with different temperatures of the surrounding rock mass in order to examine the effect of rock mass heating due to periodic storage and production of thermal energy on thermal stratification and heat loss. The change of thermal stratification with respect to time was quantitatively examined based on an index of the degree of stratification. The results of numerical simulation showed that in the early operational stage where the surrounding rock mass was less heated, the stratification of stored thermal energy was rapidly degraded over time, but the degradation and heat loss tended to reduce as the surrounding rock mass was heated during a long period of operation.

**Key words** Cavern thermal energy storage, Thermal stratification, Degree of thermal stratification, Computational fluid dynamics

**초 록** 본 연구에서는 전산유체역학 코드인 FLUENT를 이용하여 열에너지 지하 저장을 위한 최초의 대규모 암반공동인 스웨덴 Lyckebo 저장소의 열성층화 거동을 분석하였다. 열에너지의 반복적인 저장 및 생산으로 인한 주변 암반의 히팅이 열성층화와 열손실에 미치는 영향을 분석하기 위해 암반의 온도조건을 달리하여 열전달 해석을 수행하였으며, 성층화 지수를 토대로 열에너지 저장 후 시간경과에 따른 열성층화의 변화를 정량적으로 분석하였다. 분석결과, 주변 암반이 히팅되지 않은 저장공동의 초기 운영단계에서는 시간경과에 따라 저장된 열에너지의 성층화가 빠르게 저하되는것으로 나타났으며, 저장공동의 운영기간이 늘어남에 따라 주변 암반의 히팅으로 인해 열성층화의 변화 및 열손실이 줄어드는 것을 확인하였다.

**핵심어** 암반공동 열에너지 저장, 열성층화, 열성층도, 전산유체역학

## 1. 서 론

최근 에너지 수요의 증가와 함께 잉여전력, 신재생에너지, 산업폐열 등의 저장을 통한 에너지 효율성의 제고가 큰 관심사로 대두되고 있다. 특히 신재생에너지는 미래 에너지 자원으로서 큰 잠재성을 갖고 있는 반면, 에너지 생산이 기후나 계절, 시간대에 따라 가변적이고 수요 시간대와도 일치하지 않는 문제점이 있기 때문에 에너지 저장은 필수적으로 고려되어야 할 문제이다. 에

Received: Jun. 4, 2012

Revised: Jun. 18, 2012

Accepted: Jun. 18, 2012

\*Corresponding Author: Dong-Woo Ryu

Tel) +82428683099, Fax) +82428683416

E-Mail) dwryu@kigam.re.kr

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

너지 저장은 사용 목적에 따라 전기적, 기계적, 화학적, 열적 에너지 등 다양한 형태로 이루어질 수 있으며(김형목 외, 2009), 이 중 열에너지 저장은 저장온도에 따라 냉난방 및 열병합 발전(cogeneration) 목적으로 활용이 가능하다. 특히 기존의 비단열(diabatic) CAES(compressed air energy storage)에 비해 발전 효율을 크게 증대시킬 수 있는 AA-CAES(advanced adiabatic compressed air energy storage)에서는 공기 압축시 발생하는 열을 재활용하므로 효율적인 열에너지 저장이 반드시 필요하다.

열에너지 저장시 열성층화(thermal stratification)는 에너지 이용효율 측면에서 중요하게 고려되어야 할 요소 중의 하나이다. 이는 목표 저장온도 범위 내에서 열에너지가 성층화되지 않고 하나의 온도로 혼합된 경우, 필요시 원하는 온도로 활용하기 위해서는 추가적인 열교환이 요구되기 때문이다. 여기서 열성층화는 온도에 따라 밀도가 변하는 유체의 특성으로 인해 고온 및 저온의 유체가 층을 이루는 현상을 의미한다. 열에너지 저장소의 내부와 외부간의 열교환이 없는 이상적인 열성층화 상태에서는 온도가 낮은 무거운 유체가 아래에 있고, 온도가 높은 가벼운 유체는 위에 있기 때문에 열의 대류(heat convection)는 발생하지 않고, 온도층간의 열전도(heat conduction)만 발생하게 된다. 열성층도(degree of thermal stratification)는 열에너지의 주입 조건(유체 주입구의 형상, 주입속도) 및 저장소 조건(저장소의 형상 및 재질, 저장소로부터 외부로의 열손실)에 따라 영향을 받는다(박도현 외, 2012).

본 연구에서는 CFD(computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 통해 지하 암반공동 내 열에너지 저장시 열성층화 거동을 분석하고자 하였다. CFD 시뮬레이션의 적정성 및 현장 자료와의 비교 검증을 위해 최초의 대규모 열에너지 저장공동인 스웨덴 Lyckebo 암반공동을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 또한 열저장소의 장기 운영에 따른 암반의 히팅(heating)이 열성층화 및 열손실에 미치는 영향을 분석하기 위해 주변 암반의 히팅을 고려하여 열전달 해석(heat transfer analysis)을 수행하였다.

## 2. 열에너지 지하 저장을 위한 스웨덴 Lyckebo 암반공동

스웨덴 옘살라 북쪽에 위치한 Lyckebo 암반공동은 Lyckebo 지역 주변의 550가구에 대한 난방을 위해 건설되었다. 암반공동에 저장되는 100,000 m<sup>3</sup>의 물은 5,500 MWh의 열용량을 갖고 있으며, 저장된 물은 열성층화로 인해 온도층(바닥부 온도 40℃, 천정부 온도

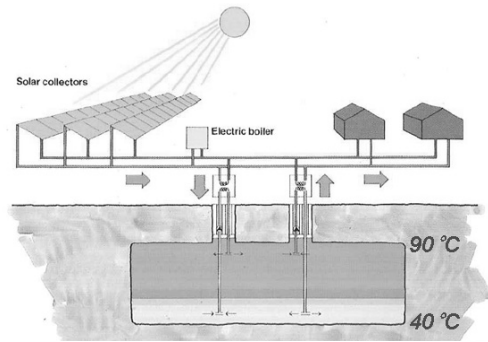


Fig. 1. Conceptual diagram of Lyckebo thermal energy storage facility (SKANSKA, 1983)

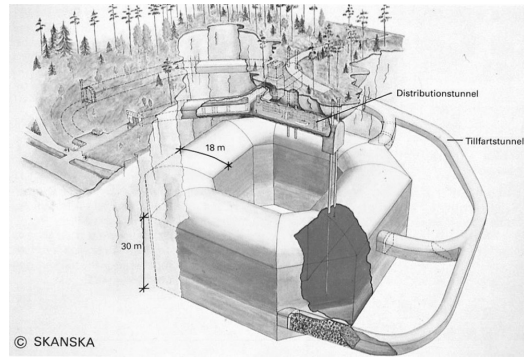


Fig. 2. Layout of Lyckebo rock cavern in Sweden (SKANSKA, 1983)

90℃)을 이루며 저장되어 있다(Fig. 1). Pilebro (2011: 박도현 외, 2012에서 재인용)에 따르면, Lyckebo 암반공동 주변의 암석은 양호한 암질의 화강암 및 편마암으로 균열이 거의 없는 상태이고, 암석 내 균열은 이차 광물(secondary mineral)로 채워져 있다. 암석은 열전도도 3.1 W/(m·℃), 비열 2,160 kJ/(m<sup>3</sup>·℃), 밀도 2.7 t/m<sup>3</sup>이었다. 저장공동 주변에 지하수 흐름속도가 매우 낮은 것으로 보고되었으며, 열에너지 주입전 초기 암반의 평균 온도는 7℃이었다. Lyckebo 암반공동은 Fig. 2와 같이 원환형태(torus)의 구조로서 단면의 폭은 18 m, 높이는 30 m이고, 지하 30 m에 공동의 천단부가 위치하고 있다.

## 3. CFD 시뮬레이션에 의한 열성층화 거동 분석

### 3.1 입력 물성치

본 연구에서는 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 열성층화 거동을 분석하기 위해 CFD 수치해석 프로그램인 FLUENT

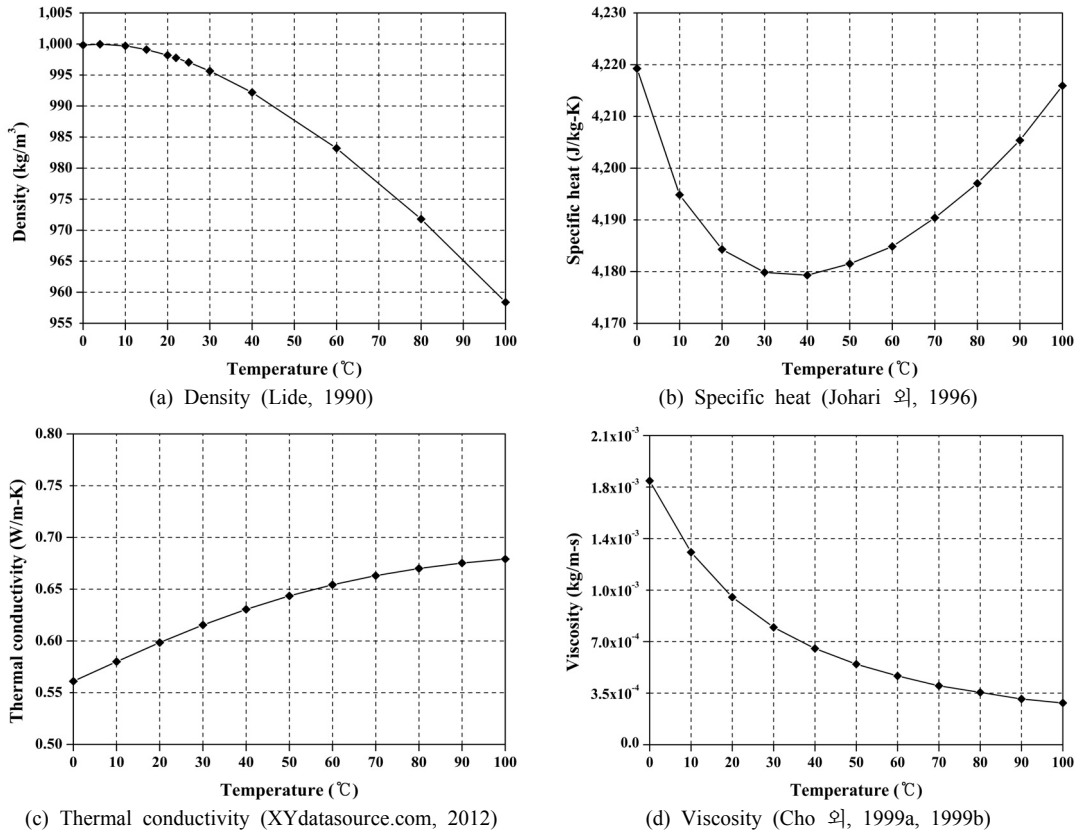


Fig. 3. Thermal properties of water with respect to temperature

(ANSYS, 2012)를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 해석을 위한 암석의 열적 물성(밀도, 비열, 열전도도, 초기 암석의 온도)은 2장에 기술된 현장자료를 적용하였다. Lyckebo 암반공동에 저장되는 열에너지는 열수(hot water)로서 물의 열적 특성에 대한 기존의 연구자료를 토대로 Fig. 3과 같이 온도에 따른 물의 열적 특성(밀도, 비열, 열전도도, 점성)의 변화를 고려하였다.

### 3.2 해석 조건 및 모델링

본 연구에서는 원환형태의 Lyckebo 암반공동을 Fig. 4와 같이 축대칭조건으로 수치모델링하였다. 열에너지 저장 후 시간경과에 따른 온도 변화를 분석하기 위해 비정상상태(transient state) 해석을 수행하였으며, 고려한 총 해석시간은 10일이었다. 본 연구에서는 FLUENT의 solid 조건을 이용하여 주변 암반을 모델링하였고, 암반 내 지하수를 고려하지 않았다. 암반공동 내 저장되는 물과 주변 암반 사이에 형성되는 wall의 경계에는

coupled 조건을 적용하여 유체와 고체간의 열전달이 가능하도록 하였다. 지상의 대기 온도는 25°C로 설정하였으며, 지표면에는 대류 경계조건을 적용하였다.

본 연구에서는 저장공동의 장기 운영에 따른 암반의 히팅이 열성층화와 열손실에 미치는 영향을 분석하기 위해 저장공동 주변 암반의 온도분포에 따른 열전달 해석을 수행하였다. 주변 암반의 온도조건은 열에너지 저장 전에 암반의 초기 온도인 7°C, 열에너지에 의해 암반의 히팅을 고려한 최저 저장온도인 40°C와 평균 저장 온도 65°C 등 세가지 경우를 고려하였다(Fig. 5). 40°C와 65°C의 열에너지에 의해 암반이 히팅된 경우의 온도 분포는 저장공동 내 물의 온도가 40°C와 65°C인 경우의 정상상태(steady state) 해석으로부터 얻은 결과를 적용하였다.

저장공동의 운영 초기에는 열에너지에 의한 암반의 히팅이 거의 없으므로 주변 암반의 온도가 7°C인 경우의 해석결과는 초기 운영단계에서의 결과로 간주할 수 있다. 한편 40-90°C 범위에서 온도별로 층을 이루며 저

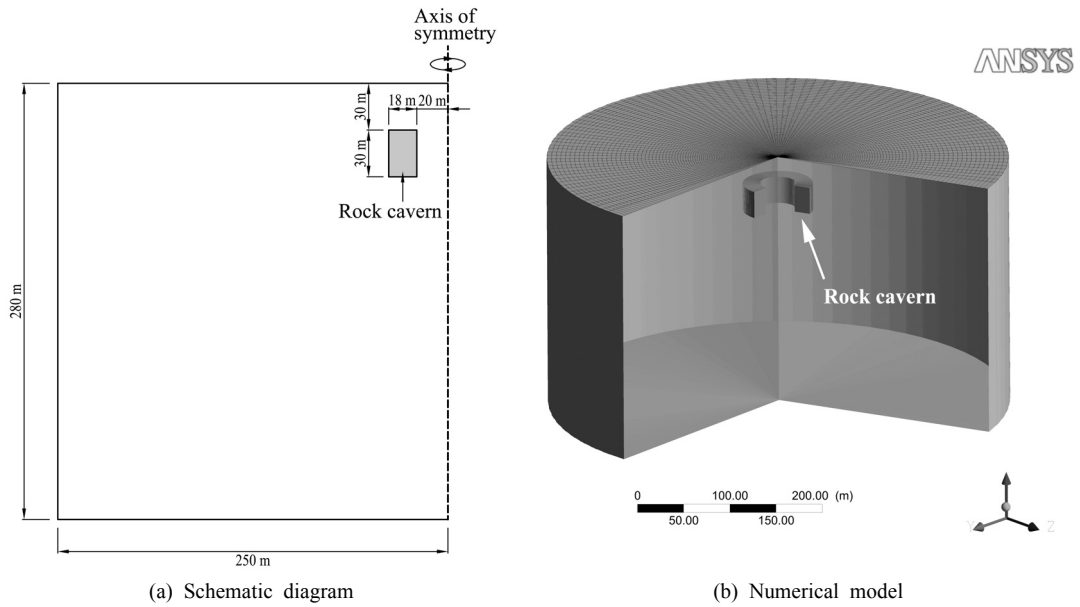


Fig. 4. Numerical modeling using axial symmetry

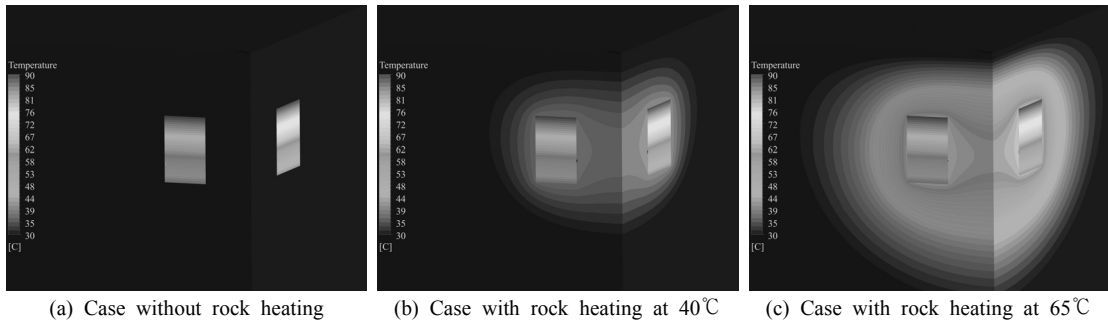


Fig. 5. Initial temperature distributions of the surrounding rock and stored water

장된 물이 시간경과에 따라 주변 암반으로의 열손실과 물 온도층간의 열전달에 의해 저장 온도의 평균인 65°C에 가깝게 혼합되고, 이후 주변 암반으로의 열손실로 인해 저장된 물의 온도가 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있었다(3장 Fig. 6 참조). 또한 SKANSKA (1983)에 따르면, 봄과 가을에는 저장된 물의 온도가 대부분 40°C를 유지하는 것으로 알려져 있다. 이로부터 저장공동을 운영함에 따라 주변 암반이 40°C와 65°C의 온도에 반복 노출되는 것으로 유추할 수 있다. 따라서 물의 온도가 65°C인 경우의 정상상태 해석으로부터 얻은 암반의 온도분포는 장기 운영단계에서 온도분포 중의 하나로 간주할 수 있고, 물의 온도가 40°C인 경우의 암반

온도분포는 초기와 장기 운영단계 사이의 온도분포로 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

참고로 저장공동의 운영기간별로 주변 암반의 온도분포를 정확히 예측하기 위해서는 운영주기를 반영한 반복적인 비정상상태 해석이 필요하다. 그러나 암반의 히팅, 즉 저장공동으로의 열손실이 정상상태가 되기까지 약 5년여의 기간이 필요(SKANSKA, 1983)한 것을 감안할 때, 운영주기를 고려한 장기간의 비정상상태 수치 해석을 통해 주변 암반의 온도분포를 예측하는 것은 현실적으로 용이하지 않으므로 위와 같이 장기 운영에 따른 주변 암반의 히팅을 고려하였다.

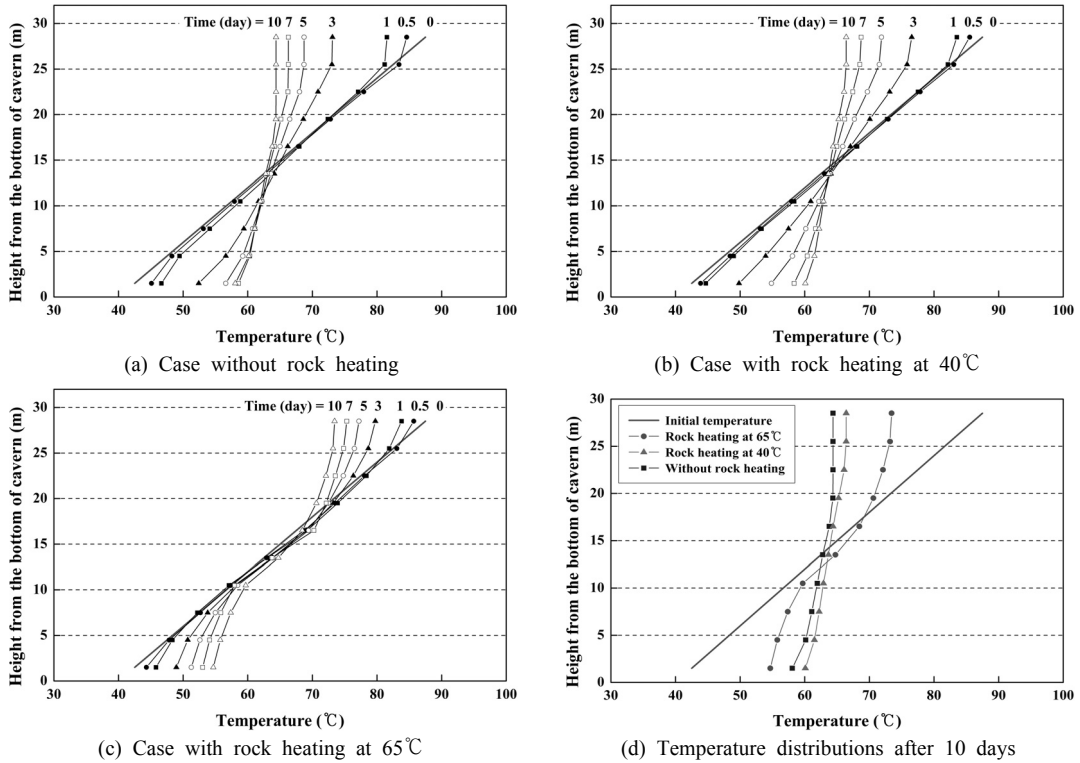


Fig. 6. Temperature change of stored water with time

3.3 암반의 히팅조건에 따른 열성층화 거동의 분석 결과

Fig. 6은 각 수치해석 case에서 측정된 열수 저장 후 시간경과에 따른 물의 온도 변화를 나타내며, 측정된 온도는 저장공동의 바닥부 기준으로 높이별 물의 평균 온도이다. 그림으로부터 암반의 히팅이 없는 초기 운영 단계에서는 시간경과에 따른 온도 변화가 암반의 히팅이 진행된 경우에 비해 크게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 암반이 점차적으로 히팅되면서 열성층화가 더 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 열에너지 저장시 주변 암반으로의 열손실이 열성층화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 암반공동 내 열에너지 저장시 저장효율을 높이기 위해서는 암반의 히팅조건에 대한 상세 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7과 8은 암반의 히팅이 없는 수치해석 case에서 물의 열성층화 상태(1일 경과 후) 및 주변 암반으로의 열손실을 나타낸다. Fig. 7에 표시된 ‘A’ 영역으로부터 저장공동 벽면 부근에서는 주변 암반과의 접촉으로 인한 열전도에 의해 초기에 형성된 수평 온도경계층이 교란되는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 열전도 현상에

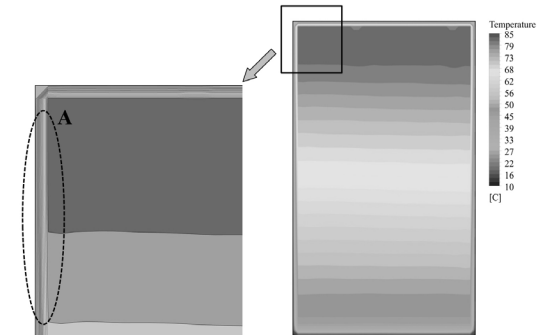


Fig. 7. Thermal stratification after 1 day in the case without rock heating

의해 Fig. 8과 같이 시간경과에 따라 주변 암반의 히팅, 즉 주변 암반으로의 열손실이 점차적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

위와 같은 시간경과에 따른 열성층화의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 Shyu 외 (1989)에 의해 제안된 변온층 구배법(thermocline gradient method)을 이용하

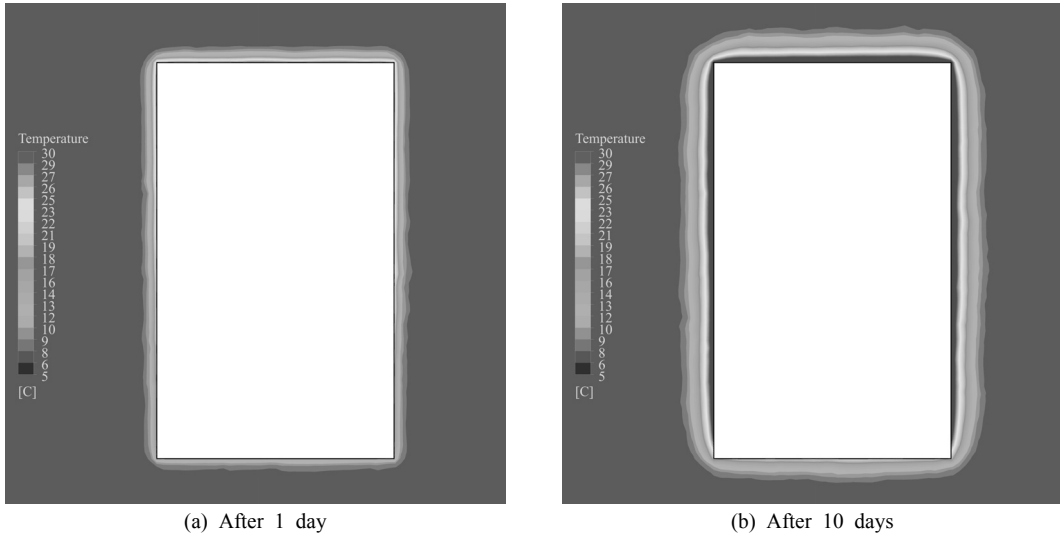


Fig. 8. Heat loss to the surrounding rock in the case without rock heating

여 열성층화 비(thermal stratification ratio)를 분석하였다. 변온층 구배법은 성층화 상태로 저장된 열에너지의 온도구배를 이용하는 방법으로, 식 (1)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.

$$R_{TS} = \frac{\left(\frac{dT}{dz}\right)_t}{\left(\frac{dT}{dz}\right)_i} \quad (1)$$

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.

Fig. 9는 열에너지 저장 후 시간경과에 따른 열성층화 비의 변화를 나타낸다. 그림으로부터 열에너지 저장 후 시간이 경과함에 따라 열성층화 비가 점차적으로 감소하고, 암반의 히팅이 점차적으로 진행되면서 열성층화 비가 그렇지 않은 경우에 비해 높게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 고려한 각 수치해석 case에서의 열손실을 분석한 결과, 초기 운영단계에 해당하는 암반의 온도가 7°C 인 경우의 열손실은 1,415 kW, 암반이 40°C 와 65°C로 히팅된 경우의 열손실은 각각 690 kW, 105 kW인 것으로 나타났다. 이로부터 암반의 히팅이 진행

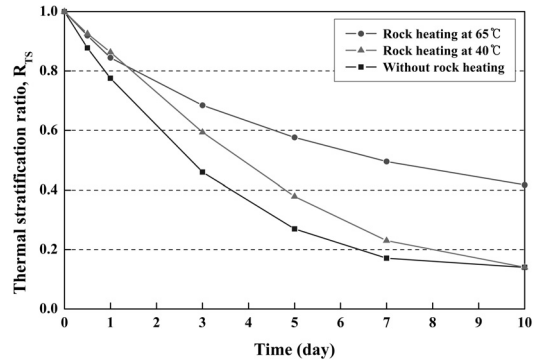


Fig. 9. Thermal stratification ratio vs. time

됨에 따라 주변 암반으로의 열손실이 점차적으로 감소하는 것으로 알 수 있었다. 각 수치해석 case에서의 열손실은 저장된 물의 초기 온도와 시간경과 후 물의 온도 변화를 고려하여 식 (2)를 토대로 계산되었다.

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2)$$

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

SKANSKA (1983)에 따르면, 장기 운영에 따른 열손실이 175 kW로 수렴하는 것으로 조사되었으며, 이는 저장된 물의 평균 온도가 28일 동안 약 1°C 감소하는 열손실에 해당한다. 본 연구의 장기 운영단계로 간주할

수 있는 65°C로 암반이 히팅된 수치해석 case에서의 열손실은 105 kW(저장된 물의 평균 온도가 28일 동안 약 0.62°C 감소하는 열손실임)로서 위의 SKANSKA 자료와 약간 차이가 있는데, 이는 장기 운영시 주변 암반의 온도분포가 서로 상이하여 나타난 결과라고 판단되며, 또한 축대칭 수치모델링으로 인한 열에너지에 노출되는 저장공동의 표면적 차이, 열에너지 저장시 열성층도의 차이 등이 추가적인 원인이 될 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 향후 연구사항

본 연구에서는 스웨덴 Lyckebo 열에너지 저장공동에 대한 CFD 시뮬레이션을 통해 지하 암반공동 내 열에너지 저장시 열성층화 거동을 분석하였으며, 수치해석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

성층화 상태로 열에너지를 저장한 후, 주변 암반으로의 열손실과 온도층간의 열전도에 의해 저장된 에너지의 열성층도가 시간경과에 따라 점차적으로 감소하고, 특정 온도로 에너지가 혼합되는 경향을 보였다. 또한 장기 운영시 암반의 히팅이 점차적으로 진행됨에 따라 암반의 히팅이 없는 초기 운영단계에 비해 열성층도가 더 높게 유지되는 것으로 분석되었다. 저장공동 외부로의 열손실을 분석한 결과, 초기 운영단계에 해당하는 암반의 온도가 7°C인 경우의 열손실은 1,415 kW, 암반이 40°C와 65°C로 히팅된 경우의 열손실은 각각 690 kW, 105 kW로서 장기 운영시 주변 암반의 히팅이 진행됨에 따라 저장공동 외부로의 열손실이 감소하는 것으로 분석되었다. 이로부터 열에너지 저장시 주변 암반의 온도조건과 장기 운영에 따른 암반의 히팅조건은 열성층도 및 열손실 평가시 고려해야 할 주요 요소인 것을 알 수 있었다. 특히 열손실을 최소화하기 위해서는 저장공동 주변 암반의 히팅이 어떤 온도범위와 운영주기에서 효과적으로 이루어지는 지에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

한편 열성층화는 열에너지 저장소의 단면 형상, 즉 종횡비(높이/폭)에 민감한 것으로 알려져 있으므로 이에 대한 정량적인 분석이 향후 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 종횡비가 클수록 열성층화에 있어 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 종횡비에 따라 열전달이 발생하는 저장소 표면적의 차이가 발생할 수 있으므로

열성층도와 열손실을 함께 고려한 분석이 필요할 것이다. 또한 암반 내 지하수 유동이 열에너지 지하 저장에 미치는 영향을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

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

#### 참고문헌

1. Kim H. M., D. W. Ryu, S. K. Chung and W. K. Song, 2009, State of the art for the underground unlined rock cavern storage technology for compressed air energy storage (CAES), Journal of the Korean Society for Geosystem 46.5, 614-624.
2. 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.
3. ANSYS, 2012, FLUENT software, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent>, accessed on May 21, 2012.
4. 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.
5. 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.
6. Lide D. R., 1990, CRC handbook of chemistry and physics, CRC Press, Florida.
7. Johari G. P., A. Hallbrucker and E. Mayer, 1996, Two calorimetrically distinct states of liquid water below 150 Kelvin, Science 273.5271, 90-92.
8. 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.
9. SKANSKA, 1983, Swedish rock technique: Lyckebo seasonal energy storage plant, SKANSKA technical brochure.
10. 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

**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 선임연구원

**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



**김형목**

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 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  
구부 책임연구원