

## 열에너지 저장 암반공동의 형상 및 레이아웃 설계 가이드라인

박도현\*, 박의섭

Guidelines for Designing the Shape and Layout of  
Thermal Energy Storage (TES) Rock Caverns

Dohyun Park\*, Eui-Seob Park

**Abstract** Thermal energy storage (TES) is a technology that stores surplus thermal energy at high or low temperatures for later use when the customer needs it, not just when it is available. TES systems can help balance energy demand and supply and thus improve the overall efficiency of energy systems. Furthermore, the conversion and storage of intermittent renewable resources in the form of thermal energy can help increase the share of renewable resources in the energy mix which refers to the distribution of energy consumption from different sources, and to achieve this, it is essential to combine renewable resources with TES systems. Underground TES using rock caverns, known as cavern thermal energy storage (CTES), is a viable option for large-scale, long-term TES utilization although its applications are limited because of the high construction costs. Furthermore, the heat loss in CTES can significantly be reduced due to the heating of the surrounding rock occurred during long-term TES, which is a distinctive advantage over aboveground TES, in which the heat loss to the surroundings is significantly influenced by climate conditions. In this paper, we introduced important factors that should be considered in the shape and multiple layout design of TES caverns, and proposed guidelines for storage space design.

**Key words** Cavern thermal energy storage, Design consideration, Performance evaluation, Thermal performance, Structural performance

**초 록** 열에너지 저장은 고온 또는 저온의 잉여 열에너지를 저장하여 수요 발생 시 사용하기 위한 기술로서 에너지의 수요와 공급 사이의 불균형을 해소하고, 이를 통해 에너지 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 특히 간헐적인 신재생에너지 자원을 열에너지 형태로 변환하거나 저장함으로써 에너지 믹스에서 신재생에너지의 비중을 제고할 수 있으며, 이를 위해서는 열에너지 저장 장치와의 조합이 반드시 필요하다. 지하 암반공동을 이용한 열에너지 저장은 높은 건설비용이 수반되어 그 활용이 제한적이지만, 대규모의 열에너지를 장기간 저장할 수 있는 가장 현실적인 방법이다. 또한 기후조건에 따라 외부로의 열손실이 영향을 받는 지상의 열저장소와는 달리, 열저장 지하 암반공동은 장기 운영 시 주변 암반의 히팅에 따른 열손실의 감소를 기대할 수 있다. 본 고에서는 열저장 암반공동의 형상 및 다중배치 설계 시 고려해야 할 주요 인자들을 소개하고, 저장공간의 설계에 대한 가이드라인을 제안하였다.

**핵심어** 암반공동 열에너지 저장, 설계 고려사항, 성능 평가, 열적 성능, 구조 성능

## 1. 서론

열에너지 저장 장치는 열에너지 발생량과 수요처의 사용량이 시간대별 또는 계절별로 불균형이 발생할 때 잉여 에너지를 저장하거나 부족한 에너지를 공급하는데 활용된다. 즉 열에너지 저장 장치는 에너지의 수요와 공급의 시간적 및 양적 차이를 보완하는 기능을 수행하며, 이를 통해 에너지 절약 및 에너지 이용효율의

Received: Mar. 9, 2015

Revised: Mar. 24, 2015

Accepted: Mar. 27, 2015

\*Corresponding Author: Dohyun Park

Tel) +82428683913, Fax) +82428683416

E-Mail) parkdo@kigam.re.kr

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

향상을 기대할 수 있다. 특히 에너지 발생이 기후나 계절, 시간대에 따라 일정하지 않고 에너지 수요 시간대와도 일치하지 않은 신재생에너지의 경우 에너지 저장을 통해 그 이용효율을 제고할 수 있다. 지하 열에너지 저장은 암반의 낮은 열전도 특성을 활용하여 지하 공간에 열에너지를 저장하는 개념으로서, 저장되는 열에너지는 온도에 따라 소규모 주거용 에너지 또는 대규모 전력발전용 에너지로 활용 가능하다. 즉 100°C 이하의 열에너지는 주거용으로 사용이 가능하며, 100~250°C 범위의 열에너지는 주거용 및 산업용, 250°C 이상의 열에너지는 발전용으로 활용할 수 있다(Shin 외, 1987).

열에너지 저장의 기본 원리는 열적 부력(thermal buoyancy)을 이용하여 고온과 저온 에너지의 혼합(mixing) 효과를 감소시켜 열에너지의 성층화를 유지하는 것으로서, 열성층화(thermal stratification) 기술은 유효에너지(available energy or exergy)를 증대하기 위한 필수 기술이다. 이는 목표 저장온도 범위 내에서 열에너지가 성층화되지 않고 일정한 온도로 완전히 혼합되는 경우, 필요 시 원하는 온도로 활용하기 위해서는 추가적인 에너지 공급에 의한 열교환이 이루어져야 하기 때문이다. 열성층화는 온도에 따라 밀도가 변하는 유체의 특성으로 인해 고온 및 저온의 에너지가 층을 이루는 현상을 의미한다. 열에너지 저장소의 내부와 외부 간의 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, 수직 방향으로 온도 변화가 있는 온도경계층(thermocline)에서의 열전도(heat conduction) 현상만 발생한다. 열성층화를 저하시키는 주요 요인에는 열에너지 주입 시 유체의 운동에너지 및 열적 부력에 의한 혼합, 열저장소 벽면 및 저장소 외부로의 열손실 등이 있다.

열저장소의 설계에 있어서 가장 우선적으로 고려해야 하는 것은 저장소의 용량 및 형태로서 저장소의 기하학적 형상 및 다중저장소 설치 시 그 배치형태 등을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 본 고에서는 열수(hot water) 저장을 중심으로 암반공동의 저장공간 설계 시 고려해야 할 주요 인자들과 이들이 저장공동의 성능에 미치는 영향에 대해 기술하였다. 또한 기존 연구사례를 분석하여 열저장 공간의 설계를 위한 가이드라인의 기본방향을 도출하고자 하였다.

## 2. 열에너지 저장공간의 설계 시 고려해야 할 주요 인자

### 2.1 저장공동의 형상

물과 같은 액체를 열에너지로 저장하는 원리는 고온

의 유입수와 저온의 저장수와의 혼합 효과를 열적 부력을 이용하여 적절히 감소시켜 열성층화를 유지하는 것이며, 유체의 열성층화는 저장된 열에너지의 이용효율 측면에서 중요한 매개변수이다. 저장소 내부의 열성층화는 물의 온도변화에 따른 밀도 차이로 인하여 온도가 높은 물이 상부에 위치하고, 하부에는 온도가 낮은 물이 위치함으로써 저장소 내 유체가 안정된 상태를 유지하는 것을 의미한다.

일반적으로 열저장소의 폭(지름)에 대한 높이의 비, 즉 종횡비(aspect ratio)가 커질수록 열성층화 효율이 증가하고, 종횡비가 일정 수준 이상이 되면 성층화 효율의 증가가 둔화되는 것으로 알려져 있다. Cole & Bellinger(1982), 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 저장 시 저장소의 종횡비를 2 이상으로 설계하는 것이 열성층화에 있어 유리하다고 제안하였다. 토러스 형상의 스웨덴 Lyckebo 암반공동에 대한 열성층화 효율 및 종횡비의 영향을 분석한 KIGAM(2012)의 연구에 따르면, 지상 저장소에 대한 기존 연구들의 결과와 유사하게 지하 암반공동의 경우도 종횡비가 증가함에 따라 열성층화 효율이 증가하고, 열적 성능 측면에서 유리한 최적 종횡비가 3.5인 것으로 조사되었다.

위의 기존 연구들로부터 저장소의 종횡비가 커질수록 열성층화 측면에서는 유리한 것으로 분석되었으나, 저장소의 종횡비 증가는 외부로의 열손실 측면에서는 불리하게 작용할 수 있다. Fig. 1은 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 종횡비별 열손실을 분석한 KIGAM(2012)의 연구결과로서, 종횡비가 커짐에 따라 저장된 열에너지의 온도감소(열손실)가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 종횡비의 증가에 따라 열에너지가 외부에 노출되는 저장공동의 표면적이 증가하여 나타난 결과로 검토되었다. 한편 높은 종횡비의 저장소는 열성층화 효율은 높지만, 폭에 비해 높이가 상대적으로 커 구조 안정성(structural stability)의 확보가 어려울 수 있다. 따라서 종횡비에 따른 열성층화와 열손실, 열성층화와 구조 안정성간의 절충(trade-off)을 통해 저장소의 최적 형상을 결정할 필요가 있으며, 이를 위해서는 저장공동의 열적

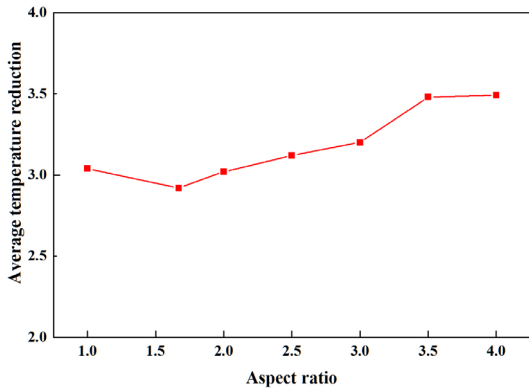


Fig. 1. Temperature reduction vs. aspect ratio (KIGAM, 2012)

성과 구조적 성능에 대한 정량적인 평가가 수행되어야 한다.

### 2.2 다중공동의 배치간격

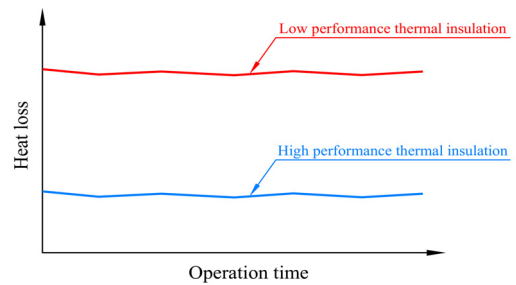
앞서 언급한대로 열저장소의 종횡비가 커질수록 성능화 효율이 향상될 수 있지만, 종횡비의 증가에 따라 저장소의 폭에 비해 높이가 커지고, 이는 저장소의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용할 수 있다. 특히 지하 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 암반 공동의 저장용량(굴착규모) 및 종횡비, 암반조건(암반의 변형 및 강도 특성, 현지응력 등)에 의해 공동의 안정성이 영향을 받으므로 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 설계가 어려울 수 있으며, 이 경우 설계 저장용량의 단일 암반공동 대신 단위 저장용량을 줄인 다중 암반공동의 적용을 고려할 필요가 있다(Park 외, 2013a). 또한 설계 저장용량 확보를 위한 긴 터널형의 단일 저장공동이 열에너지의 저장 및 주입을 위한 지상설비와의 연결에 있어 효율적이지 못한 경우에도 종방향 길이를 줄인 다중 암반공동의 활용을 고려할 필요가 있다.

다중 암반공동을 활용하여 열에너지를 저장하는 경우, 공동 간 배치간격은 저장공간 계획 시 고려해야 하는 중요한 설계인자이며, 배치간격 결정 시 공동의 구조 안정성뿐만 아니라 열저장소의 장기 운영에 따른 주변 암반의 히팅 특성을 고려할 필요가 있다. 이는 다중 암반공동의 배치간격이 가까울수록 공동 주변 암반의 거동이 역학적 및 열적으로 상호 간섭하게 되는데, 역학적 거동(암반의 변형)에 대한 상호 간섭은 공동의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용하는 반면, 열적 거동(암반 내 열전달)에 대한 상호 간섭은 암반의 히팅 효율, 즉 열적 성능 측면에서 유리하게 작용할 수 있기 때문이다(Park 외, 2014b). 따라서 다중 열저장 공동을 활

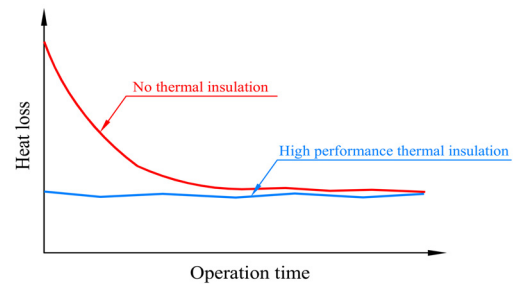
용하는 경우, 공동의 배치간격에 따른 구조 안정성 분석과 함께 열적 성능에 대한 분석이 병행되어야 한다.

### 2.3 암반 히팅

열에너지 저장소의 경우 단일시스템을 적용하더라도 외부로의 열손실이 지속적으로 발생하게 되며, 장기 운영 시 주변 암반의 히팅으로 인해 열손실이 시간경과에 따라 감소하는 지하 저장소와는 달리, 지상 저장소는 외부 대기로의 열손실이 시간에 따라 일정하게 유지되는 경향을 보이기 때문에 장기 운영에 따른 열손실의 감소를 기대하기 어렵다(Fig. 2). 특히 지상 저장소는 외부의 대기온도, 풍속, 풍향 등의 기후조건에 크게 받으므로 열손실 측면에서는 지상 저장소보다는 지하 저장소가 장기적으로 더 유리하다고 할 수 있다. KIGAM(2012)에 따르면, 주변 암반의 히팅이 없는 초기 운영단계에서는 저장공동의 종횡비 증가에 따라 공동의 표면적이 증가하여 열손실량이 늘어나는 경향을 보인 반면, 장기 운영시 주변 암반이 히팅되어 열적 평형상태에 도달한 경우에는 초기 운영단계에 비해 열손실량이 크게 줄어들고 저장공동의 종횡비가 열손실 발생에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다(Fig. 3).



(a) Aboveground TES tanks



(b) Underground TES caverns

Fig. 2. Schematic representation of the heat losses from above-ground TES tanks and underground TES caverns (Park et al., 2014b)

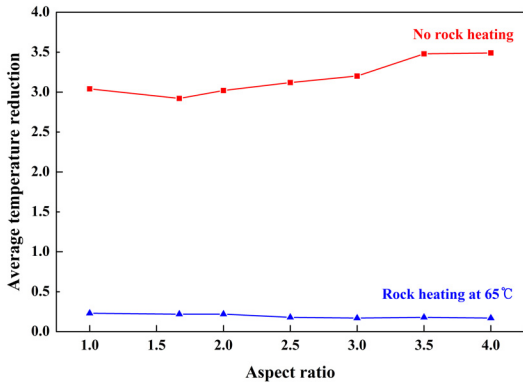


Fig. 3. Heat losses at different aspect ratios of the Lyckebo rock cavern in Sweden (KIGAM, 2012)

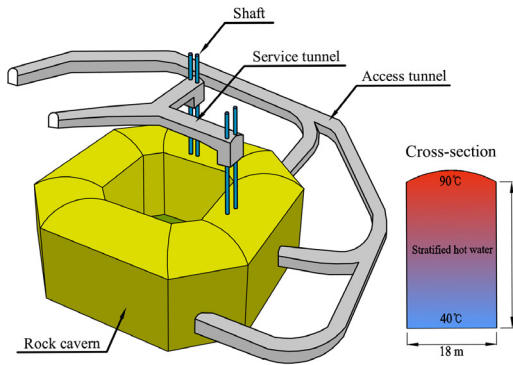


Fig. 4. Lyckebo rock cavern in Sweden (redrawn from SKANSKA (1983))

따라서 열저장 암반공동의 장기적 운영을 고려할 때, 열손실 측면보다는 열성층화 효율을 우선적으로 고려하여 저장공동의 형상을 결정할 필요가 있다고 제안하였다. 한편 Park 외(2013b)에 따르면, 암반공동을 장기 운영함에 따라 주변 암반의 온도가 점차적으로 상승하고, 이로 인해 저장된 열에너지와 주변 암반과의 온도 구배(temperature gradient)가 감소하여 암반의 히팅이 없는 초기 운영단계에 비해 저장공동 내부의 열성층도(degree of thermal stratification)가 더 높게 유지되는 것으로 분석되었다. 이러한 저장공동 주변 암반의 히팅으로 인한 영향은 지상의 열저장소와는 구별되는 특징으로서 암반공동을 활용한 열에너지 저장시 반드시 고려해야 할 주요 설계인자 중 하나이다.

열수 저장을 위한 스웨덴 Lyckebo 저장공동은 Fig. 4와 같이 중심부에 암반 기둥이 있는 토러스 형상으로 건설되었으며, 장기 운영에 따른 주변 암반의 히팅을 고려하여 토러스 형상의 암반공동을 계획한 것으로 파

악되었다. 즉 외부로의 열손실이 발생하는 암반공동의 표면적을 축소하기 위한 방안으로서 토러스 형상의 공동을 활용한 것으로 판단된다. 저장공동의 장기 운영에 따라 중심부 암반 기둥이 충분히 히팅되어 열적 평형상태에 도달하게 되면, 중심부 암반으로의 열손실이 억제되고 이 경우 중심부 암반 기둥부의 표면적은 열손실이 발생하는 전체 면적에서 제외될 수 있어 열적 성능 측면에서 유리하게 된다. Lyckebo 공동의 설계 저장용량은 100,000 m<sup>3</sup>이고, 공동의 단면 폭과 높이는 각각 18 m, 30 m이다. 토러스 형태가 아닌 터널형으로 공동을 건설하는 경우, 설계 저장용량을 확보하기 위해서는 공동의 종방향 길이를 약 185 m로 설계해야 한다. 장기 운영에 따라 중심부 암반 기둥부에서의 열손실 억제를 기대할 수 있는 토러스 형상의 공동과는 달리 터널형인 경우에는 공동의 전체 표면에서 열손실이 외부로 발생하기 때문에 토러스 형상보다는 열손실 측면에서 불리할 수 있다.

### 3. 열에너지 저장 암반공동의 성능 평가

앞서 살펴본 주요 인자들(저장공동의 형상, 다중공동의 배치간격, 암반 히팅)의 영향을 고려한 최적의 열저장 공간 설계를 위해서는 저장공동의 성능에 대한 정량적인 평가가 이루어져야 한다. 기존의 토목 및 광산 시설(도로 및 철도터널, 광산 갱도 등)의 경우 구조적 성능 평가, 즉 안정성 분석에만 초점을 두고 굴착 설계를 수행해 왔다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 열저장 암반공동의 경우에는 구조적 성능 평가뿐만 아니라 열적 성능에 대한 평가도 반드시 병행되어야 한다. 또한 기존의 암반공학 분야에서 열을 취급해 온 방향은 저장된 물질(고준위 방사성 폐기물, LNG 등)로 인한 주변 암반의 (열-수리-역학적 등) 거동에 초점을 두고 있었다. 이와는 다르게 암반공동 내 열에너지 저장의 경우에는 저장된 물질로 인한 주변 암반의 거동뿐만 아니라 공동 내부의 저장물 자체에 대한 열적 거동이 우선적으로 분석되어야 한다. 즉 열적 성능 평가에 있어 암반공동 내부의 열에너지 거동(열성층화)과 주변으로의 열손실 분석이 포함되어야 한다.

#### 3.1 구조적 성능 평가

열저장 공동의 구조적 성능은 지하공간의 굴착으로 인한 역학적 안정성을 의미하며, 굴착 안정성 평가와 관련하여 다양한 기법들이 제안되어 왔다. 구조물의 역학적 안정성 평가에서 가장 중요한 것은 구조물과 그 주변에 내재되어 있는 불확실성(uncertainty)과 무작위성(randomness)이 구조물의 역학적 거동특성에 미치는

영향을 검토하는 것이다. 지하구조물과 관련하여 현재까지는 주로 결정론적 해석기법(deterministic analysis)에 의해 구조적 성능을 분석해 왔다. 결정론적 기법에서는 지반 특성에 대한 보수적인 값이나 평균값을 적용하여 안정성을 평가하기 때문에 지반공학적 불확실성을 나타내는 분산의 체계적인 반영이 어려웠다. 이로 인해 어떤 시스템의 안정성을 나타내는 매개변수의 값이 허용 기준을 만족하는지 여부만을 평가할 수 있었다. 한편 확률론적 해석기법(probabilistic analysis)에서는 구조물의 안정성에 영향을 미치는 매개변수의 불확실성을 통계적 확률밀도에 의해 고려한다. 이로부터 구조물의 안정성은 파괴확률(probability of failure)을 토대로 정량적으로 평가되며, 분석된 파괴확률을 근거로 공학적 의사결정(decision making)을 할 수 있다. Juang 외(1999)는 캘리포니아 Moss Landing 지역의 액상화(liquefaction) 가능성을 확률론적 기법을 이용하여 평가하였다. 기존의 결정론적 해석 기법을 이용한 경우, 안전율이 기준치 이상으로 검토되어 액상화 가능성이 없는 것으로 분석되었으나, 실제 현장에서는 액상화가 일부 영역에서 발생하였다. 이를 분석하기 위해 확률론적 기법을 이용하여 액상화 가능성을 분석하였고, 실제 액상화가 발생한 영역의 파괴확률이 0.01 이상으로 액상화 가능성이 높은 것으로 검토되었다. 이 연구로부터 어떤 시스템이 허용 안전율을 만족하더라도 시스템의 파괴확률이 큰 경우에는 그 시스템이 파괴될 가능성이 높고, 결정론적 기법을 적용하는 경우 안정성 평가를 위한 기준(예, 안전율)이 신중히 설정되어야 함을 알 수 있었다. 또한 다중 열저장 공동의 이격거리별 안정성 평가를 수행한 Park 외(2014a)의 연구에서도 결정론적 해석상으로는 구조물의 안정성이 확보되는 것으로 분석되었으나, 확률론적 해석상으로는 구조물이 불안정한 것으로 검토된 경우가 있어 결정론적 기법의 적용에 있어 신중한 접근이 필요한 것으로 검토되었다.

위의 기존 연구사례와 같이 결정론적 해석을 통해서 지하구조물의 성능을 평가하는 데 있어 합리적인 결과를 얻지 못할 가능성이 있기 때문에 이를 보완하기 위해 랜덤변수의 불확실성을 확률밀도에 의해 정량적으로 고려하는 확률론적 기법의 도입을 고려할 필요가 있다. 특히 암반공동 열에너지 저장의 경우, 현재까지 건설 경험이 거의 없고 표준화된 설계 코드도 정립되지 않은 기술로서 신뢰도 기반 설계법(reliability-based design) 중 하나인 확률론적 기법을 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

한편 저장공동 내 열에너지에 의한 주변 암반의 히팅 시 열-역학적 상호 작용으로 인해 암반의 강도가 저하

되어 저장공동의 역학적 안정성이 감소할 수 있다. 따라서 장기적으로 노출되는 온도에 대한 암석의 강도 특성의 변화를 정량적으로 분석하고, 이를 반영한 열-역학적 연계해석 기반의 안정성 분석이 수행될 필요가 있다. 그러나 100℃ 미만의 열에너지 저장을 대상으로 하는 경우, 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.

3.2 열적 성능 평가

열에너지 저장소의 열적 성능을 결정하는 가장 중요한 인자는 저장소 내 열성층화로서, 성층화 기술은 유효에너지를 증대하기 위한 필수 기술이다. 저장소 내 유체의 열성층도 감소는 Fig. 5에서와 같이 (1) 저장소 외부로의 열손실, (2) 에너지의 주입 및 배출 시 유체 흐름에 의한 강제 대류(forced convection), (3) 온도층간의 열전도, (4) 저장소 벽면에서의 열전도에 의한 벽면 주위 유체의 자연 대류(natural convection)에 의해 발생한다(Park 외, 2013b). 따라서 열성층도는 유체 주입구의 형상, 유체의 주입 및 배출 속도, 저장소 형상의 종횡비, 저장소 재질 등에 의해 영향을 받게 된다. 이와 같이 열저장소 내부에서는 성층화 상태로 저장된 유체

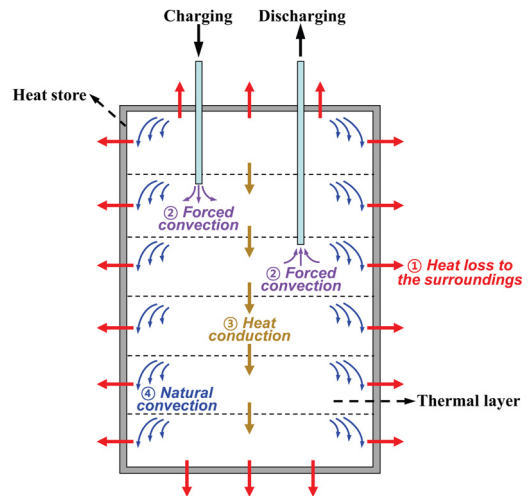


Fig. 5. Factors influencing thermal stratification (Park et al., 2013b)

층 간의 열전도 및 대류, 저장소 벽면에서의 열전도와 이로 인한 벽면부에서의 대류 등 복합적인 열전달 과정이 발생한다. 따라서 저장공동의 열적 성능을 분석하고자 하는 경우, 공동 내 열에너지의 열전도 및 대류 현상을 모사(simulation)할 수 있는 해석기법을 적용하여야 한다.

열저장소 내 성층화 거동 분석과 관련하여, 기존에 지반공학 분야에서 많이 사용되어 온 고체역학 기반의 해석 프로그램을 적용할 수도 있으나, 이 경우 유체층 간의 열전도만 모사 가능하고, 유체의 온도별 밀도 차이에 의한 자연대류 현상 및 그로 인한 열에너지의 혼합(성층화 감소)을 모델링할 수 없어 저장소 내 열성층도가 과대 평가될 수 있는 문제점을 안고 있다. 따라서 유체의 열전도와 대류 현상의 모사가 가능한 전산유체역학(computational fluid dynamics) 기반의 해석기법을 적용하는 것이 열저장소의 열적 성능 평가에 있어 합리적인 것으로 판단된다. 특히 유체의 주입(charging) 및 배출(discharging)에 따른 저장소 내 강제 대류 현상을 모델링하기 위해서는 전산유체역학 기법에 기반한 성능 평가를 고려해야 할 것이다.

한편 지상의 저장소와는 달리 암반공동을 활용한 열에너지 지하 저장의 경우, 주변 암반에서의 지하수 흐름에 따른 영향을 고려할 필요가 있다. 이는 투수성이 높은 암반이거나 절리를 따른 지하수 흐름이 우세한 경우, 저장공동 내부로의 지하수 유입 또는 저장된 열에너지의 공동 외부로의 누출로 인해 성층화 상태로 저장된 열에너지의 성층도가 감소하는 혼합현상이 발생하여 공동의 열적 성능이 저하될 수 있기 때문이다.

### 3.3 열저장 암반공동의 개념모델 설계 사례

KIGAM(2013, 2014)에서는 국내의 화강암과 석회암 지역을 대상으로 지하 열에너지 저장 연구를 수행하였으며, 열수 저장(열수 저장온도 = 50~95°C) 암반공동 개념모델을 설계하기 위해 구조적 성능 및 열적 성능을 분석하였다. 이 연구에서는 단위 암반공동에 저장된 열수(열교환용 난방수와 직접사용 급탕수)의 최대 사용가능 기간을 동절기 2개월(60일)로 설정하였으며, 공급 대상은 수도권 아파트 1개 단지(1,000세대, 세대당 면적 = 106 m<sup>2</sup>)로 설정하였다. 국내 아파트의 세대당 난방요금을 분석하여 단위 암반공동의 설계 저장용량을 84,000 m<sup>3</sup>으로 결정하였다. 이 설계 저장용량을 토대로 단일 저장공동의 종횡비 및 다중 저장공동의 이격거리별 구조적 성능과 열적 성능을 분석하였다. 구조적 성능 평가에서는 전단강도감소(shear strength reduction) 기법의 안전율에 기반한 결정론적 기법과 구조물의 파

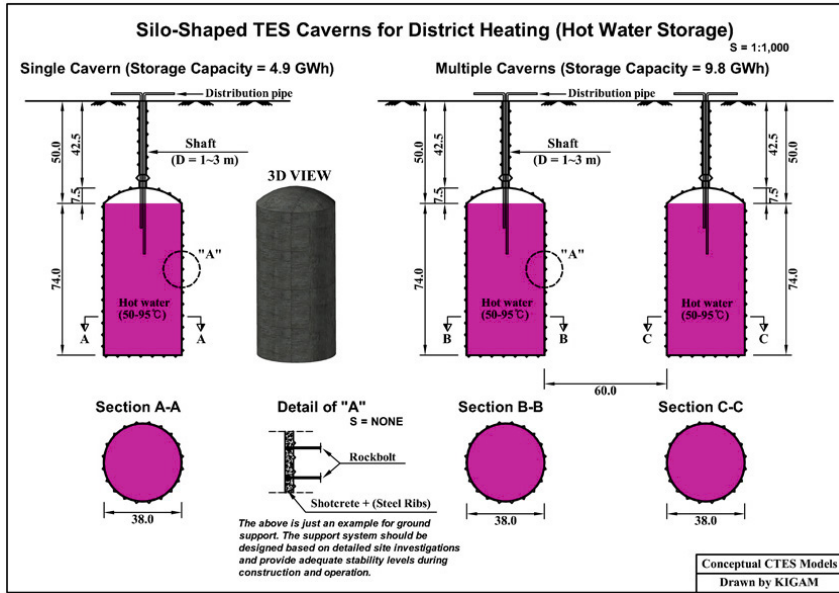
괴확률에 기반한 신뢰도 기반 기법을 적용하였으며, 공동의 안정성은 안전율과 파괴확률을 토대로 분석되었다. 저장공동의 열적 성능 평가는 전산유체역학 수치코드를 활용하여 분석하였으며, 열에너지의 주입과 배출이 없는 대기운영 모드(standby mode of operation)에서의 저장공동 내부의 열성층화 거동 및 외부로의 열손실 발생 경향을 분석하였다.

KIGAM(2013, 2014)에 따르면, 저장공동의 성능 분석으로부터 공동의 종횡비가 커질수록 열성층도가 높게 유지되나, 높은 종횡비 적용시 공동의 역학적 안정성 측면에서는 불리한 것으로 나타나 최적 종횡비 결정시 열적 성능 분석과 함께 역학적 안정성에 대한 분석이 필요한 것으로 검토되었다. 또한 대규모 열에너지 저장을 위한 다중공동의 이격거리별 성능을 분석한 결과, 이격거리 증가에 따라 다중 암반공동의 굴착 안정성이 향상되는 경향을 보인 반면, 주변 암반의 히팅과 열손실의 감소가 느리게 진행되어 열적 성능 측면에서는 불리한 것으로 나타났다. 이로부터 열저장 공동의 형상 및 다중공동의 배치간격 설계를 위해서는 공동의 역학적 안정성뿐만 아니라 열적 성능에 대한 분석이 수행되어야 함을 알 수 있었다.

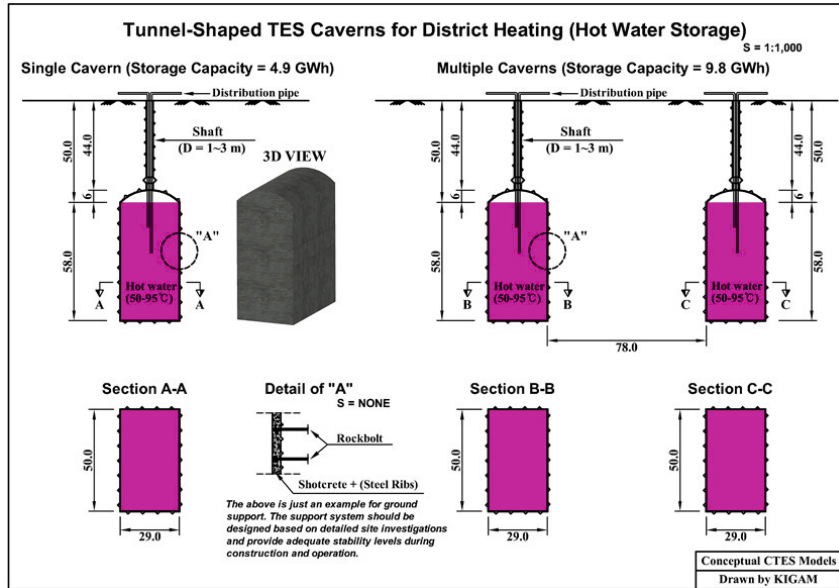
Fig. 6은 저장공동의 성능 분석결과를 토대로 설계된 열수 저장용 암반공동 개념모델을 나타낸다(KIGAM, 2014). 성능 분석으로부터 결정된 단일 저장공동의 설계 제원은 다음과 같다. 사일로형 암반공동의 최적 종횡비는 약 2.0으로 공동의 폭과 높이는 각각 38 m, 74 m이었으며, 터널형 암반공동의 경우, 최적 종횡비는 2.0, 공동의 폭과 높이는 각각 29 m, 58 m이었다. 여기서 암반공동의 높이는 열에너지가 저장되는 최대 높이로서 공동의 천단 아치부 높이를 제외한 값이다. 다중공동 설치를 위한 최적 배치간격은 사일로형의 경우 1.5W (W = 암반공동의 폭), 터널형의 경우 2.7W인 것으로 분석되어 설계 배치간격은 사일로형과 터널형에 대해 각각 60 m와 78 m이었다. KIGAM(2014)에서 제안한 Fig. 6의 암반공동 개념모델은 열에너지의 주입 및 배출과 관련된 지상설비를 포함하지 않은 모델로서 향후 지상설비 분야와의 융합 연구를 통해 개념모델을 최종적으로 완성할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 4. 열저장 암반공동의 형상 및 레이아웃 설계 가이드라인 제안

본 고에서 살펴본 열저장 공간 설계 시 고려해야 할 주요 인자들의 영향과 열수 저장 암반공동에 대한 기존 연구사례로부터 열저장 암반공동의 형상 설계 및 저장



(a) Silo-shaped caverns



(b) Tunnel-shaped caverns

Fig. 6. Conceptual rock cavern models for hot water storage (KIGAM, 2014)

공동의 다중배치를 위한 이격거리 결정 시 공동의 역학적 안정성과 열적 성능에 대한 정량적인 분석이 병행되어야 함을 알 수 있었다. 이는 굴착 공간의 구조 안정성 분석에 초점을 둔 기존의 토목 및 광산 지하시설과는 구별되는 특징으로서, 이러한 특징을 고려한 열저장 공동의 설계 가이드라인이 마련될 필요가 있다. 본 고에

서는 열저장 암반공동의 형상과 다중배치 설계를 위한 가이드라인(안)을 다음과 같이 제안하고자 한다. 제시된 내용은 한 가지 안으로서 향후 추가 연구를 통해 그 적합성이 검토되어야 한다. 또한 암반공동 내 열에너지 저장은 지상의 기계설비 분야와의 융합 연구가 반드시 필요한 기술로서 에너지, 토목, 기계 분야 등의 관련 학

회와 전문가 집단의 의견 수렴을 거쳐 최종적으로 규정 이 마련되어야 할 것이다.

### 1) 목적

이 가이드라인은 열에너지 저장을 위한 암반굴착형 지하공동의 형상과 다중배치와 관련된 설계기준을 정함을 목적으로 한다.

### 2) 다른 기준과의 관계

이 가이드라인은 열저장 암반공동의 저장공간 설계 시 고려해야 할 사항들을 제시한 권장 지침(안)이며, 이 지침에서 규정하고 있지 아니한 사항은 “터널설계기준”(MOCT(건설교통부, 2007) 및 “터널표준시방서”(MLTM(국토해양부, 2009), 기타 관련 법규 및 기준에서 제시한 내용을 따른다.

### 3) 열저장공동의 최적 형상 결정

- 열저장공동의 종횡비(폭에 대한 높이의 비)가 커짐에 따라 저장소의 열적 성능은 향상되는 반면 구조 안정성은 감소하는 상반된 경향을 보이므로 열저장공동의 종횡비 결정시 공동의 열적 성능과 구조 안정성에 대한 분석이 병행되어야 한다.
- 저장공동의 열적 성능 분석에서는 공동의 종횡비별로 저장소 내 에너지의 열성충화와 외부로의 열손실 측면에서 그 성능을 평가해야 한다. 열성충화는 저장소 내 성충화의 정도를 정량화할 수 있는 지표를 토대로 분석되어야 한다.
- 저장공동의 구조 안정성 분석에서는 공동의 종횡비별 굴착 안정성을 평가해야 한다. 굴착 안정성은 건설교통부의 “터널설계기준”에 준하여 평가하며, 공동 굴착 후 지반의 허용변위량, 전단강도감소기법의 안전율, 신뢰도 기반 확률론적 해석의 파괴확률을 안정성 평가 지표로 활용할 수 있다. 종횡비가 큰 암반공동의 경우, 굴착 심도가 깊어질 수 있으므로 공동 주변 암반의 취성파괴에 대한 안정성도 검토할 필요가 있다.
- 저장공동 내 열에너지에 의한 주변 암반의 히팅 시 열-수리-역학적(T-H-M) 상호 작용으로 인해 암반의 강도가 저하되어 저장공동의 구조 안정성이 장기적으로 감소할 수 있으므로 이러한 상호 작용의 영향을 고려하여 안정성을 평가해야 한다. 이를 위해 실내 또는 현장시험을 통해 대상 암반의 열-수리-역학적 상호 거동(예, 온도에 따른 강도 특성의 변화)을 분석할 필요가 있다. 다만, 일반적으로 100℃ 이하의 온도에 노출된 암반은 강도저하가 크지 않을

것으로 예상되므로 이 경우 T-H-M 커플링 기반의 안정성 해석을 생략할 수 있다.

- 저장공동의 굴착 안정성 확보 문제로 인해 열적 성능 측면에서 유리한 높은 종횡비의 저장소 설계가 불가능한 경우, 단위 저장부피를 줄인 다중 암반공동의 적용을 고려할 필요가 있다. 다중 암반공동 적용 시 배치간격의 설계는 아래의 「열저장공동의 다중배치 간격 결정」을 따른다.

### 4) 열저장공동의 다중배치 간격 결정

- 다중 열저장공동의 배치간격(이격거리)이 감소함에 따라 공동 주변 암반의 거동이 역학적 및 열적으로 상호 간섭하게 되는데, 역학적 거동(암반의 변형)에 대한 상호 간섭은 공동의 구조 안정성 측면에서 불리하게 작용하고, 열적 거동(암반 내 열전달)에 대한 상호 간섭은 암반의 히팅 효율, 즉 열적 성능 측면에서 유리한 상반된 경향을 보이므로 배치간격 결정 시 공동의 열적 성능과 구조 안정성에 대한 분석이 병행되어야 한다.
- 다중 공동의 열적 성능 분석에서는 공동의 배치간격별로 저장소 내 에너지의 열성충화와 외부로의 열손실 측면에서 그 성능을 평가해야 한다. 열성충화는 저장소 내 성충화의 정도를 정량화할 수 있는 지표를 토대로 분석되어야 한다.
- 다중 공동의 구조 안정성 분석에서는 공동의 배치간격별로 전반적인 굴착 안정성을 평가해야 한다. 굴착 안정성은 건설교통부의 “터널설계기준”에 준하여 평가하며, 다중 공동 사이의 필라 부분에 작용하는 응력과 암반강도의 비율(강도응력비), 공동 굴착 후 지반의 허용변위량, 전단강도감소기법의 안전율, 신뢰도 기반 확률론적 해석의 파괴확률을 안정성 평가 지표로 활용할 수 있다. 필라부의 강도응력비를 안정성 평가 지표로 사용하는 경우에는 필라부에 발생하는 불균등한 지반응력의 영향을 고려해야 한다.
- 저장공동 내 열에너지에 의한 주변 암반의 히팅 시 열-수리-역학적(T-H-M) 상호 작용으로 인해 암반의 강도가 저하되어 저장공동의 구조 안정성이 장기적으로 감소할 수 있으므로 이러한 상호 작용의 영향을 고려하여 안정성을 평가해야 한다. 이를 위해 실내 또는 현장시험을 통해 대상 암반의 열-수리-역학적 상호 거동(예, 온도에 따른 강도 특성의 변화)을 분석할 필요가 있다. 다만, 일반적으로 100℃ 이하의 온도에 노출된 암반은 강도저하가 크지 않을 것으로 예상되므로 이 경우 T-H-M 커플링 기



반의 안정성 해석을 생략할 수 있다.

### 5) 열적 성능 및 구조 안정성 평가 방법

- 유체를 매개체로 열에너지를 저장하는 경우, 저장소 내부에서는 성층화 상태로 저장된 유체층 간의 열전도 및 대류, 저장공동 벽면에서의 열전도 등 복합적인 열전달 과정이 발생한다. 따라서 수치해석적으로 저장공동의 열적 성능을 분석하고자 하는 경우, 이러한 열전달 거동을 모사할 수 있는 해석기법(예, 전산유체역학)을 적용해야 하며, 공학적으로 공인되어 널리 사용되는 해석 프로그램을 이용해야 한다.
- 저장공동의 구조 안정성 평가와 관련된 일반사항은 건설교통부의 “터널설계기준”을 따른다. 다만, 열에너지 저장을 위한 암반공동의 건설 경험과 실적이 국내외적으로 많지 않은 실정이므로 기존의 허용응력 설계법(working stress design)과 더불어 통계 및 확률 기반의 한계상태 설계법(limit-state design)의 적용을 권장한다.

## 5. 맺음말

본 고에서는 열에너지 저장을 위한 암반공동의 저장공간 설계 시 고려해야 할 주요 인자들과 이들이 공동의 구조적 성능과 열적 성능에 미치는 영향을 소개하였고, 열저장 공동의 성능 평가 시 고려해야 할 사항들에 대해 기술하였다. 또한 기존의 열수 저장 암반공동 연구사례를 분석하여 열저장 공간의 설계에 대한 가이드라인을 제안하였다. 제안된 가이드라인은 향후 암반공동 열에너지 저장기술의 설계기준을 수립하기 위한 참고자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

암반공동 열에너지 저장은 기존의 건설 경험 및 표준화된 설계 코드, 그리고 국내외적으로 학술적 연구도 많지 않은 기술이다. 본 고에서는 열수 저장에 대한 국내의 개념모델 연구사례를 분석하여 설계 가이드라인의 방향을 제시하였으나, 향후 지하 열에너지 저장 관련 연구들이 진행됨에 따라 제안된 설계 가이드라인의 적합성을 검토하고 수정 보완해야 할 것이다.

## 사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발(과제코드 GP2015-010)’의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 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.
2. Cole R.L. and F.O. Bellinger, 1982, Thermally stratified tanks, *ASHRAE Transactions* 88, 1005-1017.
3. 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.
4. 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.
5. Hahne E. and Y. Chen, 1998, Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores, *Solar Energy* 64, 9-18.
6. Hariharan K., K. Badrinarayana, S.S. Murthy and M.V. Murthy, 1991, Temperature stratification in hot-water storage tanks, *Energy* 16, 977-982.
7. 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.
8. 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.
9. Juang C.H., D.V. Rosowsky and W.H. Tang, 1999, Reliability-based method for assessing liquefaction potential of soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125.8, 684-689.
10. 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.
11. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2013, Development of core technology for underground thermal energy storage in rock cavern, Research report GP2011-003-2012(2) Part. III, Ministry of Knowledge Economy, Seoul.
12. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2014, Development of core technology for underground thermal energy storage in rock cavern, Research report GP2011-003-2012(3) Part. III, Ministry of Knowledge Economy, Seoul.
13. 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.
14. 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.
15. MOCT (Ministry of Construction and Transportation),

2007. Design standards for tunnels, MOCT, Seoul.
16. MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2009. Standard specifications for tunneling, MLTM, Seoul.
  17. 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.
  18. Park D., D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013a, Mechanical stability analysis to determine the optimum aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage, Tunnel & Underground Space 23.2, 150-159.
  19. Park D., D. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2013b, Thermal stratification and heat loss in underground thermal storage caverns with different aspect ratios and storage volumes, Tunnel & Underground Space 23.4, 308-318.
  20. Park D., E.S. Park and C. Sunwoo, 2014a, Analysis of the optimal separation distance between multiple thermal energy storage (TES) caverns based on probabilistic analysis, Tunnel & Underground Space 24.2, 155-165.
  21. Park D., E.S. Park and C. Sunwoo, 2014b, Thermal performance analysis of multiple thermal energy storage (TES) caverns with different separation distances using computational fluid dynamics, Tunnel & Underground Space 24.3, 201-211.
  22. Shin B.C., S.D. Kim and K.Y. Park, 1987, Characteristics of high-temperature energy storage materials, The Magazine of Korean Solar Energy Society 7.1, 61-74.
  23. SKANSKA, 1983, Swedish rock technique: Lyckebo seasonal energy storage plant, SKANSKA technical brochure.

---

### 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 지구환경연구  
본부 선임연구원

---



---

### 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 지구환경연구  
본부 책임연구원

---