

열에너지 저장소 내 열성층화를 평가하기 위한 기법

박도현, 류동우*, 최병희, 선우춘, 한공창

Methods to Characterize the Thermal Stratification in Thermal Energy Storages

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

Abstract A primary objective in creating a stratified thermal storage is to maintain the thermodynamic quality of energy, so thermally stratified energy can be extracted at temperatures required for target activities. The separation of the thermal energy in heat stores to layers with different temperatures, i.e., the thermal stratification is a key factor in achieving this objective. This paper introduces different methods that have been proposed to characterize the thermal stratification in heat stores. Specifically, this paper focuses on the methods that can be used to determine the ability of heat stores to promote and maintain stratification during the process of charging, storing and discharging. In addition, based on methods using thermal stratification indices, the degrees of stratification of stored energy in Lyckebo rock cavern in Sweden were compared and the applicability of the methods was investigated.

Key words Thermal stratification, Degree of thermal stratification, Stratification efficiency, Thermal energy storage, Cavern thermal energy storage

초 록 열에너지를 성층화하여 저장하는 주된 목적은 에너지의 열역학적 질을 유지하기 위한 것으로서 열에너지의 성층화를 통해 필요시 원하는 온도에서 열에너지 활용이 가능하다. 저장소 내 열에너지의 온도에 따른 분리, 즉 열성층화는 이와 같은 열에너지의 활용에 영향을 미치는 핵심 인자이다. 본 논문에서는 열성층화의 정도를 평가할 수 있는 기준에 제안된 기법들을 소개하였으며, 특히 열에너지의 주입, 저장, 배출 과정 동안 열저장소의 성층화와 관련된 성능을 결정하는 데 사용될 수 있는 기법들을 중심으로 개념 및 특징을 살펴보았다. 또한 열성층화 지수를 이용하는 방법을 토대로 스웨덴 Lyckebo 암반공동 내 열에너지의 성층도를 비교 분석하여 기법의 적용성을 조사하였다.

핵심어 열성층화, 열성층도, 성층화 효율, 열에너지 저장, 암반공동 열에너지 저장

1. 서 론

열에너지 저장은 태양열에너지, 산업폐열 등으로부터의 열에너지를 특정 공간에 일정 기간 동안 저장하는 기술로서, 열에너지 저장 장치는 에너지의 수요와 공급의 시간적 및 양적 차이를 보완하는 기능을 수행한다.

이를 통해 에너지 절약 및 에너지 이용효율의 향상을 기대할 수 있다. 특히 에너지 발생이 기후나 계절, 시간대에 따라 일정하지 않고, 에너지의 수요 시간대와도 일치하지 않은 신재생에너지의 경우 에너지 저장을 통해 그 이용효율을 높일 수 있다.

열에너지 저장의 기본 원리는 열적 부력(thermal buoyancy)을 이용하여 고온에너지와 저온에너지의 혼합 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 하나의 온도로 혼합된 경우, 필요시 원하는 온도로 활용하기 위해서는 추가적인 열교환이 요구되기 때문이다. Fig. 1은 열에너지를 성층화 상태로 저장한 경

Received: Jan. 22, 2013

Revised: Feb. 5, 2013

Accepted: Feb. 7, 2013

*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

우와 하나의 온도로 혼합된 상태로 저장한 경우를 비교한 그림이다. Fig. 1(a)는 열저장소 부피의 절반은 50°C의 에너지, 나머지 절반은 30°C의 에너지로 채워진 경우를 나타내고, Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 열저장소와 같은 부피의 공간에 50°C와 30°C의 에너지를 혼합하여 40°C의 에너지로 모두 채운 경우를 나타낸다. 열에너지로서 이용가능한 온도가 50°C라면, Fig. 1(a)의 경우, 저장소 부피의 절반을 차지하는 50°C의 에너지를 유효에너지로서 그대로 사용할 수 있지만, Fig. 1(b)의 경우, 저장소 내 에너지가 모두 50°C 미만의 에너지로 이용가능한 유효에너지는 0이 된다. 이와 같이 열에너지 저장시 열성층화의 중요성은 상대적 유효에너지와 함께 이해되어야 한다. Lochrke 외(1979)와 Park 외(1989)는 열성층화가 잘 발달된 열저장소는 완전 혼합형 저장소에 비해 유효에너지 이용률이 10% 이상 크다고 보고하였다.

열성층화는 온도에 따라 밀도가 변하는 유체의 특성으로 인해 고온 및 저온의 에너지가 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. 열성층화를 저하시키는 주요 요인에는 열에너지 저장시 유체의 운동에너지 및 열적 부력에 의한 혼합, 열저장소 벽면 및 외부로의 열손실 등이 있다.

현재까지 암반공학 분야에서 열을 취급해 온 방향은 저장된 물질(고준위 방사성 폐기물, LNG 등)로 인한 주변 암반의 열-역학-(수리-화학적) 거동에 초점이 맞춰

진 반면, 본 논문은 기본적으로 주변 암반의 열적 특성(또는 암반 가열 조건 등)으로 인한 저장 물질의 열적 거동, 즉 열성층화의 변화를 정량화하는 데 연구 목적이 있다. 이를 위해 열역학 분야의 다양한 열성층도(degree of thermal stratification) 정량화 기법들을 조사하고 특징을 비교 분석하였으며, 정량화 기법을 암반 공동을 활용한 대용량 열에너지 저장 분야에 적용하여 분석 결과를 제시하였다.

2. 열성층화 평가 기법

기준에 제안된 열성층화 평가 기법은 크게 도해적 방법(graphical method), 열성층화 지수를 이용하는 방법, 열역학 법칙에 기반한 에너지 접근법(energy approach), 엑서지 접근법(exergy approach) 및 혼합법(combined method)으로 분류된다. 도해적 방법은 열저장소 내 위치별 열에너지의 온도분포를 그래프로 나타내어 분석하는 방법이고, 열성층화 지수를 이용하는 방법은 열성층도를 정량적으로 표현할 수 있는 지수를 통해 열성층화의 정도를 평가하는 방법이다. 에너지 및 엑서지 접근법은 각각 열역학 제1법칙과 제2법칙에 기반하여 성층화 효율을 분석하는 방법이고, 혼합법은 열역학 제1법칙과 제2법칙을 모두 고려한 기법이다.

2.1 도해적 방법

도해적 방법은 열저장소의 바닥으로부터 위치를 y축(또는 x축)으로 하고 해당 위치에서의 온도를 x축(또는 y축)으로 하는 그래프를 이용하여 열성층도를 분석하는 방법이다(Fig. 2). 각 축은 주어진 원래의 값을 그대로

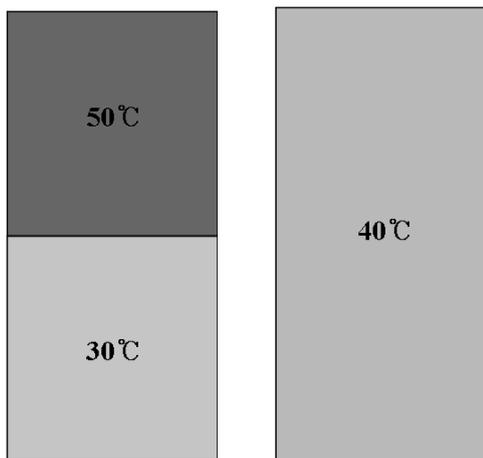


Fig. 1. Stratified thermal energy vs. mixed thermal energy

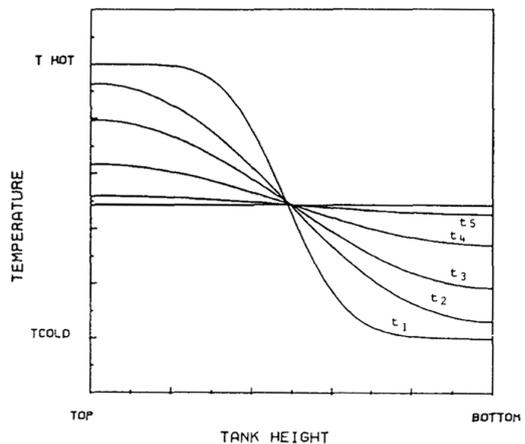


Fig. 2. Graphical presentation for the thermal stratification in a heat store (Ghaddar & Al-Marafie, 1989)

사용하거나, 특정 값으로 나눈 정규화된 무차원 변수(non-dimensional variable)가 사용되기도 한다. 무차원 높이를 사용하는 경우, 열저장소 내 위치 z 를 열저장소의 높이 H 로 나눈 변수, 즉 $z^* = z/H$ 가 사용되며, z^* 는 저장소의 바닥부에서 0, 저장소의 천정부에서 1이 된다. 열저장소 단면의 폭에 대한 높이의 비(= 높이/폭)를 나타내는 종횡비(aspect ratio)가 서로 다른 경우, 무차원 높이를 사용함으로써 열성층화 거동을 상호 비교할 수 있다. 무차원 온도는 식 (1)에 의해 표현된다.

$$T^* = \frac{T_{actual} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

여기서 T^* 는 무차원 온도, T_{actual} 은 해당 위치에서의 실제 온도(K), T_{max} 와 T_{min} 은 각각 열에너지를 저장하는 동안의 최대와 최소 온도(K)이다.

2.2 열성층화 지수를 이용하는 방법

2.2.1 변온층 구배법(thermocline gradient method)

변온층 구배법은 성층화 상태로 저장된 열에너지의 온도구배, 즉 dT/dz (T = 온도, z = 저장소 바닥중심으로부터 측정되는 수직좌표 축)를 이용하는 방법이다. Sliwinski (1978)는 저장소의 중심 수직축을 따라 온도구배를 계산한 후, 최대 온도구배의 90% 값을 성층도를 평가하기 위한 온도구배로 사용하였다. Shyu 외(1989)는 식 (2)와 같이 초기 성층화 조건에서 저장소 내 온도구배의 평균값과 특정 시간에서 온도구배의 평균값을 이용하여 열성층도를 평가하였다. 저장소 상하부의 일부 영역에서는 외부로의 열손실로 인해 다른 위치에 비해 현저히 작게 온도구배가 나타날 수 있고, 이로 인해 저장소의 열성층도가 왜곡될 수 있다. 이러한 영향을 고려하기 위해 저장소 상하부의 일정 영역을 배제하고 온도구배를 계산하기도 한다.

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

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

2.2.2 평균 제곱 편차법(mean square deviation method)

Wu & Bannerot(1987)은 열성층도 평가를 위해 식 (3)과 같이 저장소 내부 온도의 평균 제곱 편차에 기반한 성층화 계수(stratification coefficient)를 정의하였다.

$$ST = \frac{1}{m_{store}} \sum_{i=1}^N m_i [T_i - T_{avg}]^2 \quad (3)$$

여기서 ST 는 성층화 계수, m_{store} 는 저장소 내 매질의 질량(kg), N 은 저장소를 수평층으로 나눈 간격의 수, i 는 저장소 내 i 번째 수평층, T_i 는 i 번째 수평층의 온도(K), T_{avg} 는 저장소 내 열에너지의 질량 가중 평균 온도(mass-weighted average temperature, K)이다.

2.3 에너지 접근법

에너지 접근법은 열역학 제1법칙에 기반한 방법으로 열에너지의 주입·대기·배출 모드에서 얻거나 손실된 에너지 비율(energy fraction)을 계산한다. Abdoly & Rapp (1982)는 열에너지 주입 전 저장소 내에 있는 낮은 온도 에너지와 주입된 높은 온도 에너지의 경계면에 형성되는 변온층(thermocline)의 열성층도 감소를 측정하기 위해 회수가능한 에너지(recoverable energy) 비율을 성층화 효율로 사용하였다. 이들의 방법에서는 저장된 열에너지의 온도가 초기 주입시 변온층 온도차(주입된 열에너지의 온도와 주입 전 저장소 내 있는 에너지의 온도 차이)의 20% 미만으로 감소하는 경우에만 회수가능한 것으로 가정하였다. Zurigat & Ghajar(2002)는 Abdoly & Rapp(1982)의 방법을 식 (4)와 같이 정리하였다.

$$\eta = \frac{\int_0^{t_d} c \cdot |T_{out} - T_{inlet}| dt}{m_{store} \cdot c \cdot |T_{inlet} - T_{ini}|} \quad (4)$$

여기서 η 는 성층화 효율, t_d 는 저장된 열에너지의 온도가 초기 주입시 변온층 온도차의 20% 이상 감소하기 시작한 시간(sec), 즉 $|T_{out} - T_{inlet}| < 0.8 \cdot |T_{inlet} - T_{ini}|$ 인 시간, m_{store} 는 저장소 내 매질의 질량(kg), c 는 열저장 매질의 비열(J/kg-K), T_{out} 과 T_{inlet} 은 각각 열에너지 배출 및 주입시 온도(K), T_{ini} 는 열에너지 주입 전 저장소 내에 있는 열에너지의 온도(K)이다.

Chan 외(1983)는 열에너지의 주입과 배출 과정에서 사용될 수 있는 방법을 식 (5)와 같이 제안하였다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 저장소 내 열성층도는 초기 주입시 열에너지의 온도와 열에너지 저장 후 특정 시점 t 에서의 평균 온도를 이용하여 분석된다. 이 방법에서는 열에너지의 주입 및 배출시 이상 플러그 유동(ideal plug flow)을 가정한다. 이상 플러그 유동은 Fig. 3과 같이 열에너지의 주입 또는 배출시 저장소 벽면에서의 마찰과 외부와의 열교환 없이 주입·배출 방향을 따라 일정하게 저장 매질이 흐르면서 원래 차지하고 있던 매질을

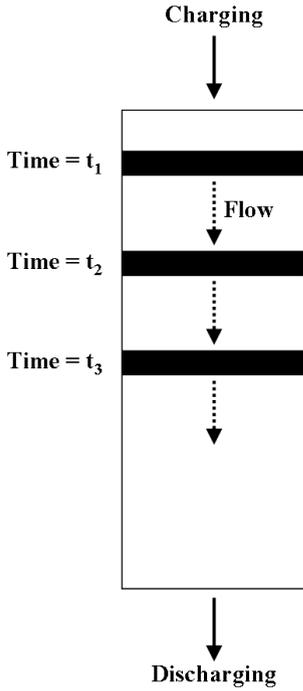


Fig. 3. Conceptual diagram of ideal plug flow

밀어내는 이상적인 유체 흐름을 의미한다.

$$\eta(t) = \frac{m_{store} \cdot c \cdot [T_{avg}(t) - T_{ini}]}{m_{store} \cdot c \cdot [T_{inlet} - T_{ini}]} = \frac{[T_{avg}(t) - T_{ini}]}{[T_{inlet} - T_{ini}]} \quad (5)$$

여기서 η 는 에너지 비율, m_{store} 는 저장소 내 매질의 질량(kg), c 는 열저장 매질의 비열(J/kg-K), $T_{avg}(t)$ 는 시간 t 에서 저장소 내 열에너지의 질량 가중 평균 온도(K), T_{inlet} 은 열에너지 주입시 온도(K), T_{ini} 는 열에너지 주입 전 저장소 내에 있는 에너지의 온도(K)이다.

Davidson 외(1994)는 열성층화 분석을 위해 식 (6)의 에너지 모멘텀(energy momentum)을 이용하여 Davidson-Adams MIX number를 제안하였다.

$$M = \sum_{i=1}^N y_i \cdot E_i \quad (6)$$

$$E_i = \rho_i \cdot V_i \cdot c_i \cdot T_i \quad (7)$$

여기서 M 은 에너지 모멘텀(J·m), N 은 저장소를 수평층으로 나눈 간격의 수, i 는 저장소 내 i 번째 수평층, y_i 는 i 번째 수평층의 저장소 바닥으로부터의 높이(m), E_i , ρ_i ,

V_i , c_i , T_i 는 각각 i 번째 수평층의 에너지(J), 밀도(kg/m³), 부피(m³), 비열(J/kg-K), 온도(K)이다.

식 (8)은 열성층화의 정도를 평가하기 위한 Davidson-Adams MIX number를 나타낸다. 이 식에서 볼 수 있듯이, 저장소 내 열에너지가 하나의 온도로 완전히 혼합된 경우 MIX = 1이고, 완전한 열성층화가 이루어진 경우 MIX = 0이다.

$$MIX = \frac{M_{stratified} - M_{actual}}{M_{stratified} - M_{mixed}} \quad (8)$$

여기서 MIX는 Davidson-Adams MIX number, $M_{stratified}$ 와 M_{mixed} 는 각각 완전한 열성층화 상태와 완전히 혼합된 상태에서의 에너지 모멘텀(J·m), M_{actual} 은 특정 시점에서의 열저장소 내 에너지 모멘텀(J·m)이다.

2.4 엑서지 접근법

엑서지 접근법은 열역학 제2법칙에 기반한 방법으로 에너지의 유효성(usefulness) 또는 질(quality)을 나타내는 엑서지를 이용하며, 엑서지를 계산하기 위해서는 기준 상태인 사상상태(dead state)가 사전에 정의되어야 한다. 열저장소의 이용 목적에 따라 사상태가 설정되며, 사상태에서 엑서지는 0이다. Rosengarten(1999)은 식 (9)와 같이 엑서지에 기반한 성층화 효율(stratification efficiency) 개념을 도입하여 열성층도를 평가하였다. Rosen(2001)과 Shah & Furbo(2003)도 Rosengarten(1999)의 방식과 유사한 방법을 제안하였다. 이와 같은 엑서지 접근법들은 열에너지의 배출시 성층화 정도를 평가하는 데 사용된다.

$$\eta = \frac{\zeta}{m_{store} c (T_d - T_{mean})} = 1 - \frac{T_0}{H(T_d - T_{mean})} \int_0^H \ln\left(\frac{T_d}{T(y)}\right) dy \quad (9)$$

여기서 η 는 성층화 효율, ζ 는 엑서지(J), m_{store} 는 저장소 내 매질의 질량(kg), c 는 열저장 매질의 비열(J/kg-K), H 는 열저장소의 높이(m), T_0 은 엑서지가 0이 되는 사상태 온도(K), T_d 는 열에너지로서 이용가능한 한계 온도(K), T_{mean} 은 저장소 내부의 질량 가중 평균 온도(K), y 는 저장소 바닥으로부터 측정되는 수직좌표 축, $T(y)$ 는 위치 y 에서의 온도(K)이다.

2.5 혼합법

Panthalookaran 외(2007)는 열역학 제1법칙과 제2법칙을 모두 고려하여 열성층도를 평가할 수 있는 혼합법

을 제안하였다. 이 방법에서는 열성층도를 평가하기 위해 엔트로피 생성비(entropy generation ratio)와 에너지 응답(energy response)을 각각 식 (10) 및 (11)과 같이 정의하였다.

$$R_{EG} = \frac{(\Delta S_{real} - \Delta S_{stratified})}{(\Delta S_{mixed} - \Delta S_{stratified})} \quad (10)$$

$$E_R = \frac{\Delta E_{real}}{\Delta E_{ideal}} \quad (11)$$

여기서 R_{EG} 와 E_R 은 각각 엔트로피 생성비와 에너지 응답, S 는 총 엔트로피(J/K), E 는 에너지(J), *real*은 실제 열에너지 저장 과정, *stratified*는 열에너지의 완전한 성층화 상태, *mixed*는 열에너지가 하나로 온도로 혼합된 상태, *ideal*은 열성층도를 분석하기 위해 기준이 되는 이상적인 상태를 의미한다.

위에서 언급한 이상적인 상태란 주입·배출 모드에서는 2.3절에서 언급한 이상 플러그 유동을 의미하고, 대기 모드에서는 저장소 외부와의 열교환은 발생하지만 열저장소 내부에서 매질의 대류(convection)가 발생하지 않고 고체와 같이 매질간의 열전도만 발생하는 상태를 의미한다. 주입·배출과 대기 모드에서의 이상적인 상태가 서로 다르기 때문에 열성층도를 평가하기 위한 성층화 효율은 식 (12)와 (13)과 같이 두 가지 형태로 표현된다. 식 (12)는 주입·배출 모드에서의 성층화 효율을, 식 (13)은 대기 모드에서의 성층화 효율을 나타낸다. 위의 두 가지 식에서 엔트로피 생성비 R_{EG} 에 대해 에너지 응답 E_R 이 주입·배출 모드에서는 나뉘지고 대기 모드에서는 곱해지는데, 이는 성층화 효율이 두 가지 조건(주입·배출과 대기 모드)에서 모두 1보다 작은 값을 갖도록 하기 위한 것이다.

$$\eta = \left[1 - \frac{R_{EG}}{E_R} \right] = \left[1 - \frac{\Delta S_{real} - \Delta S_{stratified}}{\Delta S_{mixed} - \Delta S_{stratified}} \cdot \frac{\Delta E_{ideal}}{\Delta E_{real}} \right] \quad (12)$$

$$\eta = \left[1 - R_{EG} \cdot E_R \right] = \left[1 - \frac{\Delta S_{real} - \Delta S_{stratified}}{\Delta S_{mixed} - \Delta S_{stratified}} \cdot \frac{\Delta E_{real}}{\Delta E_{ideal}} \right] \quad (13)$$

여기서 η 는 성층화 효율, R_{EG} 와 E_R 은 각각 엔트로피 생성비와 에너지 응답, S 는 총 엔트로피(J/K), E 는 에너지(J), *real*은 실제 열에너지 저장 과정, *stratified*는 열에너지의 완전한 성층화 상태, *mixed*는 열에너지가 하나

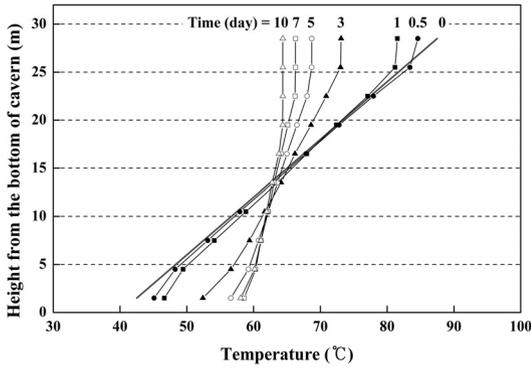
로 온도로 혼합된 상태, *ideal*은 열성층도를 분석하기 위해 기준이 되는 이상적인 상태를 의미한다.

2.6 평가 기법들의 주요 특징

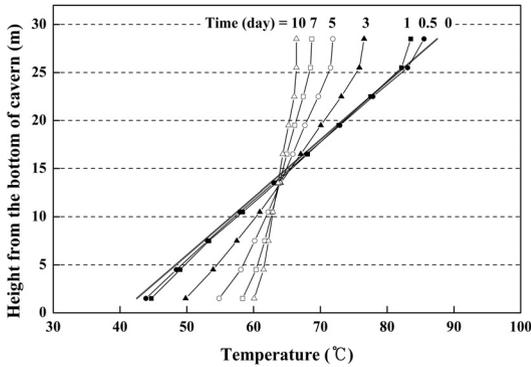
위에서 기술한 열성층화 평가 기법들은 다음과 같은 특징을 갖고 있다. 도해적 방법은 열저장소 내 성층화를 그래프로 표현하므로 가장 간단하고 쉬운 방법이지만, 성층도를 정량적으로 표현할 수 있는 인자를 사용하지 않으므로 정성적인 평가에 국한된다. 열성층화 지수를 이용하는 변온층 구배법과 평균 제곱 편차법은 열성층화 비 또는 계수를 이용하여 열성층도를 표현하므로 저장소 내 열에너지의 성층화 정도를 정량적으로 평가하는 데 활용될 수 있다. 그러나 열성층화 지수를 이용하는 방법은 열저장소를 임의 개수의 수평층으로 분할한 후, 각 수평층 온도구배의 평균값 또는 저장소 내 평균온도에 대한 편차값을 사용하므로 저장소 내부의 온도 분포(temperature distribution)가 서로 다르더라도 온도구배의 평균값이나 저장소 내 평균온도에 대한 편차값이 같은 경우 열성층도가 동일하게 평가될 수 있다. 따라서 열성층화 지수를 이용하는 경우에는 도해적 방법에 의한 성층도의 평가도 함께 이루어지는 것이 바람직할 것이다. 에너지 접근법, 엑서지 접근법 및 혼합법은 성층화 효율을 분석하는 방법으로 열에너지로서 이용가능한 한계 온도, 열에너지의 주입·대기·배출 모드에서의 경계조건(열에너지 주입 및 배출시 온도, 대기 모드에서 저장소 내 온도 등), 엑서지 및 엔트로피를 계산하기 위한 기준 상태(사상태, 완전한 성층화 상태, 완전한 혼합 상태 등)에 대한 정보가 있어야 활용이 가능하다. 참고로 Panthaloakaran 외(2007) 혼합법은 비교적 최근의 기법으로 유효성과 적용성이 아직 검증되지 않은 것으로 알려져 있다(Haller 외, 2009).

3. 적용 사례 및 결과 고찰

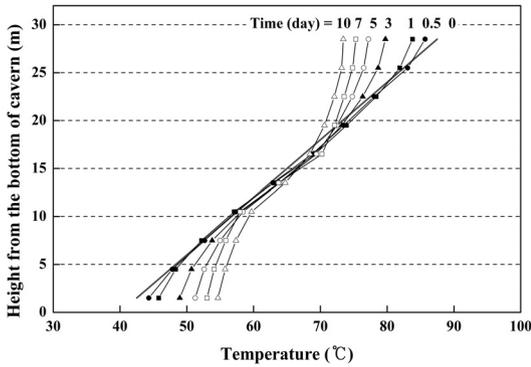
본 연구에서는 열성층화 지수에 의해 성층화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 변온층 구배법과 평균 제곱 편차법을 이용하여 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 열성층도를 비교 분석하였다. Lyckebo 암반공동의 열에너지 주입 및 배출 조건, 열에너지로서 이용가능한 한계 온도 등에 대한 상세 자료가 부족하여 에너지 접근법, 엑서지 접근법 및 혼합법에 의한 분석이 어려우므로 열성층화 지수를 이용하는 위의 두 가지 방법을 적용하였다. 본 논문에서는 Lyckebo 암반공동의 열성층화 거동을 분석한 Park 외(2012)의 온도 분포 자료를 활용하였다 (Fig. 4 참조). Park 외(2012)의 연구에서는 열에너지 주



(a) Case without rock heating (Case 1)



(b) Case with rock heating at 40°C (Case 2)

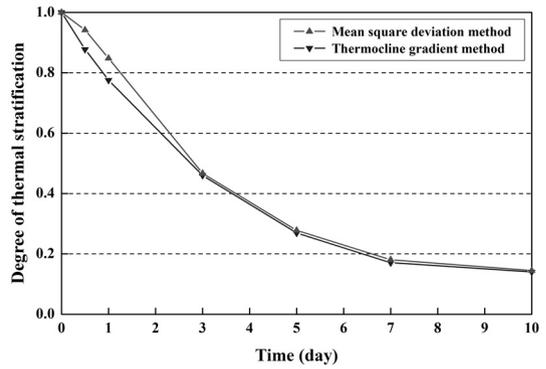


(c) Case with rock heating at 65°C (Case 3)

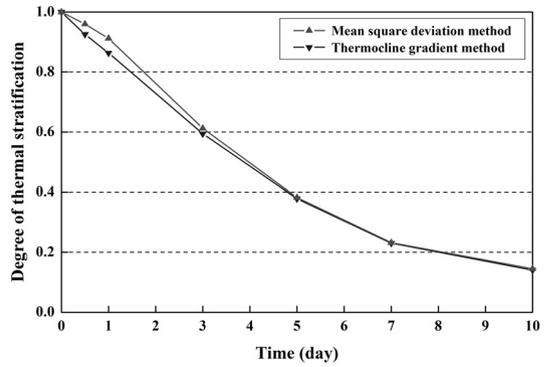
Fig. 4. Graphical presentations for the degree of thermal stratification in the Lyckebo rock cavern during the standby mode of operation (Park 외, 2012)

입 후 대기 운영모드에서의 열성층화 거동을 분석하였으며, 열에너지 주입 후 초기 대기 모드에서 완전한 성층화 조건을 가정하였다.

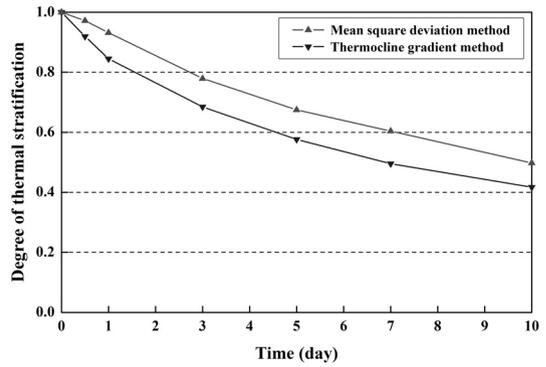
Fig. 5는 Park 외(2012)의 Lyckebo 암반공동의 해석



(a) Case without rock heating (Case 1)



(b) Case with rock heating at 40°C (Case 2)



(c) Case with rock heating at 65°C (Case 3)

Fig. 5. Comparisons of the degree of thermal stratification

사례별 온도 분포 자료를 토대로 분석한 변온층 구배법과 평균 제곱 편차법의 열성층도를 비교한 그래프이다. 그림에서 암반가열이 없는 해석 사례(Case 1)는 저장공동의 초기 운영단계, 65°C로 암반이 가열된 해석 사례(Case 3)는 장기 운영단계, 40°C로 암반이 가열된 해석 사례(Case 2)는 초기와 장기 운영의 중간 단계를 나타

낸다(Park 외, 2012). 변온층 구배법에 의한 열성층도는 Park 외(2012)의 자료이며, 본 논문에서는 평균 제곱 편차법에 의해 열성층도를 추가적으로 분석하였다. 변온층 구배법의 열성층도와 비교하기 위해 평균 제곱 편차법에 의한 시간 t 에서의 Wu & Bannerot 열성층화 계수를 열에너지 저장 초기 시점에서의 열성층화 계수로 나누어 값을 열성층화 비로 정의하였다(식 (14)). 참고로 Fig. 5에서 열성층도가 1인 경우는 열에너지 저장 초기에 형성된 완전한 성층화 상태(fully stratified)를 의미하고, 0인 경우는 초기에 형성된 온도층의 경계가 완전히 사라지고 하나의 온도로 열에너지가 완전히 혼합된 상태(fully mixed)를 의미한다.

$$R_{Ts} = \frac{ST_i}{ST_t} \quad (14)$$

여기서 R_{Ts} 는 성층화 비, ST 는 Wu & Bannerot의 열성층화 계수, i 는 열에너지 저장의 초기 시점, t 는 경과한 시간을 의미한다.

Fig. 5로부터 평균 제곱 편차법의 열성층도가 변온층 구배법에 의한 값보다 다소 높게 평가되고, 장기 운영단계를 나타내는 Case 3에서는 그 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 시간경과에 따른 열성층도의 감소 경향은 두 가지 분석법 모두 유사한 것을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 적용한 두 가지 평가 기법이 온도와 관련된 변수의 평균값에 기반하므로 시간경과에 따른 열성층도의 변화가 유사한 경향을 보이는 것으로 판단되며, 열성층도 값의 차이는 성층도 평가를 위한 변수들이 상이하여 나타난 결과로 판단된다(변온층 구배법에서는 온도 구배, 평균 제곱 편차법에서는 평균온도에 대한 제곱 편차를 열성층도 평가를 위한 변수로 사용함).

위의 열성층화 지수를 이용한 성층도 평가는 Fig. 4와 같은 도해적 방법의 열성층도, 즉 그래프로 표현된 시간 경과에 따른 열성층도의 변화를 정량적으로 표현할 수 있는 한 가지 방법이라고 판단되며, 이와 같이 정량화된 열성층화 지수는 열에너지 저장소의 성능을 결정(예, 최적의 열성층화 상태를 나타내는 열저장소의 단면 중형비 결정)하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 맺음말

본 논문에서는 열에너지의 주입, 저장, 배출 동안 열저장소의 성층화 정도를 평가할 수 있는 기존 기법들의 원리 및 특징을 소개하였으며, 열성층화 지수를 이용하는 방법을 토대로 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 열성층

도를 비교 분석하였다.

열성층화 평가 기법들의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다. 도해적 방법은 열저장소 내 성층화를 저장소 높이별 온도분포로 표현하므로 가장 간단하게 열성층도를 분석할 수 있는 기법이나, 온도분포 그래프에 기반하므로 정성적인 평가만 가능하다. 열성층화 지수를 이용하는 방법은 정량화 지수에 기반하므로 열성층도의 정량적인 평가가 가능하나, 성층도 평가를 위한 변수의 평균값을 이용하므로 온도 분포가 서로 다른 경우더라도 열성층도가 동일하게 평가될 수 있다. 따라서 도해적 방법에 의한 평가가 병행될 필요가 있다. 열역학 법칙에 기반한 기법들은 성층도 평가를 위한 기준 상태 등에 대한 정보가 필요하며, 일부 기법들은 유효성이 아직 검증되지 않았다.

한편 스웨덴 Lyckebo 암반공동의 열성층도에 대한 비교 분석을 통해 열성층화 지수를 이용하는 방법이 최적의 단면 중형비 결정과 같은 열에너지 저장소의 성능을 평가하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 본 고에서 살펴본 바와 같이, 저장소 내 열에너지의 성층화 정도를 평가하기 위한 다양한 기법들이 존재하나, 열성층도에 대한 exact 해를 제공하지 않는 것에 주의해야 할 것이다. 또한 각 평가 기법은 열성층도 평가를 위한 전제 조건이나 가정이 있으므로 이러한 사항을 고려하여 적용해야 할 것이다.

사 사

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

참고문헌

1. Abdoly, M.A. and D. Rapp, 1982, Theoretical and experimental studies of stratified thermocline storage of hot water, *Energy Conversion and Management* 22, 275-285.
2. Davidson, J.H., D.A. Adams and J.A. Miller, 1994, A coefficient to characterize mixing in solar water storage tanks, *Journal of Solar Energy Engineering* 116, 94-99.
3. Ghaddar, N.K. and A.M. Al-Marafie, 1989, Numerical simulation of stratification behavior in thermal storage tanks, *Applied Energy* 32, 225-239.
4. Haller, M.Y., C.A. Cruickshank, W. Streicher, S.J. Harrison, E. Andersen and S. Furbo, 2009, Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage — Review and theoretical comparison, *Solar Energy* 83, 1847-1860.
5. Loehrke R.L., J.C. Hoolzer, H.N. Cari and M.K. Sharp, 1979, Stratification enhancement in liquid thermal storage

tanks, Journal of Energy 3.3, 129-130.

6. Panthaloorkan, V., W. Heidemann, and H. Müller-Steinhagen, 2007, A new method of characterization for stratified thermal energy stores, Solar Energy 81.8, 1043-1054.
7. Park E.T., S.I. Hwang and Y.I. Choi, 1989, Experimental study on the thermal storage efficiency through variable porous manifolds in a test storage tank, Solar Energy 9.3, 37-43.
8. Park, D., H.M. Kim, D.W. Ryu, B.H. Choi, C. Sunwoo and K.C. Han, 2012, Numerical study on the thermal stratification behavior in underground rock cavern for thermal energy storage (TES), Tunnel and Underground Space 22.3, 188-195.
9. Rosen, M.A., 2001, The exergy of stratified thermal energy storages, Solar Energy 71, 173-185.
10. Rosengarten, G., 1999, A second law approach to characterising thermally stratified hot water storage with application to solar water heaters, Journal of Solar Energy Engineering

11. Shah, L.J. and S. Furbo, 2003, Entrance effects in solar storage tanks, Solar Energy 75.4, 337-348.
12. 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.
13. Sliwinski, B.J., A.R. Mech and T.S. Shih, 1978, Stratification in thermal storage during charging, Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada, Vol. 4, 149-154.
14. Wu, L. and R.B. Bannerot, 1987, Experimental study of the effect of water extraction on thermal stratification in storage, Proceedings of the 1987 ASME-JSME-JSES Solar Energy Conference, Honolulu, USA, Vol. 1, 445-451.
15. Zurigat, Y.H. and A.J. Ghajar, 2002, Heat transfer and stratification in sensible heat storage, In: Dincer, I. and M. Rosen (Eds.), Thermal Energy Storage — Systems and Applications, John Wiley & Sons, New York, 264-270.

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

최병희



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237
 E-mail: bhchoi@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

한공창



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

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

류동우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099
 E-mail: dwryu@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 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 지구환경연구본부 책임연구원