

복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 열역학적 에너지수지 분석

김형목¹⁾, 박도현^{1)*}, 류동우¹⁾, 최병희¹⁾, 송원경²⁾

Thermodynamic Energy Balance Analysis of Underground Lined Rock Cavems (LRC) for Compressed Air Energy Storage (CAES)

Hyung-Mok Kim, Dohyun Park, Dong-Woo Ryu, Byung-Hee Choi, Won-Kyong Song

Abstract In this paper, we performed thermodynamic energy balance analysis of the underground lined rock cavern for compressed air energy storage (CAES) using the results of multi-phase heat flow analysis to simulate complex groundwater-compressed air flow around the cavern as well as heat transfer to concrete linings and surrounding rock mass. Our energy balance analysis demonstrated that the energy loss for a daily compression and decompression cycle predominantly depends on the energy loss by heat conduction to the concrete linings and surrounding rock mass for a sufficiently air-tight system with low permeability of the concrete linings. Overall energy efficiency of the underground lined rock caverns for CAES was sensitive to air injection temperature, and the energy loss by heat conduction can be minimized by keeping the air injection temperature closer to the ambient temperature of the surroundings. In such a case, almost all the heat loss during compression phase was gained back in a subsequent decompression phase. Meanwhile, the influence of heat conductivity of the concrete linings to energy efficiency was negligible.

Key words Thermodynamic energy balance analysis, Heat transfer, Lined rock cavern (LRC), Compressed air energy storage (CAES)

초 록 본 연구에서는 지하 압축공기에너지 저장공동 주변 지하수 및 압축공기의 유체유동과 열전달 거동 해석을 위한 다상다성분 열유동 해석 결과를 이용하여 지하 저장공동의 열역학적 에너지수지 분석을 통한 에너지 효율 평가를 실시하였다. 복공재인 콘크리트 라이닝이 충분한 기밀성능을 발휘할 경우, 주입-압축과정에서 저장공동으로부터 손실되는 에너지의 대부분은 콘크리트 라이닝 및 주변 암반에 열전도를 통해 발생함을 확인하였다. 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지 효율은 압축공기 주입온도에 민감한 결과를 보였으며, 주입온도가 주변 암반의 온도에 근사할 경우, 손실된 에너지의 대부분이 토출 팽창과정에서 저장공동으로 유입·회수되는 결과를 보였다. 한편, 콘크리트 라이닝의 열전도특성이 저장공동의 에너지효율에 미치는 영향은 크지 않았다.

핵심어 열역학적 에너지 수지분석, 열전달, 지하 복공식 암반공동, 압축공기에너지저장

1. 서 론

풍력, 태양광, 조력 에너지 등과 같은 신재생에너지는 가변적 전력 생산 및 전력 생산의 조절이 불가능한 특성으로 인하여 에너지 저장 장치가 필수적이다. 또한, 최

근 주목을 받고 있는 스마트그리드(Smart Grid) 체계에서는 전력공급의 안정성 및 전력수급의 효율성을 향상시키기 위하여 대용량 전력에너지저장 장치가 요구된다.

대용량 전력에너지저장 시설로서 지하 압축공기에너지 저장(CAES, Compressed Air Energy Storage) 기술은 건설·운영중인 양수발전소의 추가 건설이 어려운 상황에서 이를 대체할 수 있는 유일한 저장방식으로 주목받고 있다. 또한, 암반 내 지하공동을 활용한 압축공기에너지 저장방식은 전력소비지인 도심지 혹은 신재생에너지 발전단지 인근에 자유로이 건설할 수 있다는 입지 선정의 유연성이 큰 장점으로 평가된다(한국지질자

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : parkdo@kigam.re.kr

접수일 : 2011년 7월 5일

심사 완료일 : 2011년 8월 5일

게재 확정일 : 2011년 8월 16일

원연구원, 2009).

지하 압축공기에너지 저장시스템은 신재생에너지 및 원자력발전 등으로부터의 유희전력이나 저품질의 전원을 이용하여 압축공기형태로 지하 저장공동에 저장하고 필요시 연료와 함께 터빈을 운전하여 전력을 생산하는 시스템이다. 따라서, 지하 압축공기에너지 저장시스템이 계획된 발전능을 발휘하기 위해서는 설계 발전량을 충당할 수 있는 충분한 공기질량이 저장공동 내부에 저장되어야 한다. 이를 위해서는 저장공동 내부의 압축공기가 외부로 누출되지 않도록 하기 위한 기밀성능이 확보되어야하며 저장공동 내부에 콘크리트 라이닝을 비롯한 복공시스템을 이용하여 기밀성능을 확보하기 위한 시도가 진행중에 있다(한국지질자원연구원, 2010).

지하 압축공기에너지 저장공동 내부 압축공기는 압축 및 팽창을 반복함에 따라 온도변화를 수반하게 된다. 압축공기의 주입압축과정에서는 저장공동 내부 온도가 점차 상승하여 주입 공기온도보다도 높아지게 된다. 이러한 온도 상승으로 인하여 압축공기는 팽창하고 저장공기압은 증가하여 저장공동 내부에 저장되는 공기 질량은 감소하게 된다. 이 경우 주어진 저장공동 내부에 설계 발전량에 필요한 충분한 양의 압축공기를 저장할 수 없게 된다. 또한, 저장 압축공기의 열량이 복공재 및 주변암반으로 손실될 경우, 공기질량 및 공기압력이 시간이 지남에 따라 점차 감소하게 되고 발전 가능한 공기압력 이하로 떨어지는 경우도 발생할 수 있다. 따라서, 저장공동의 역학적 안정성 및 기밀성능의 확보와 함께 지하 압축공기에너지 저장공동의 열역학적 안정성 검토를 위한 정량적 에너지수지 분석이 요구된다.

지하 압축공기에너지 저장과정에서의 에너지수지 분석과 관련한 연구로는 Succar & Williams(2008)가 공기 압축 및 팽창과정에서 발생하는 열을 에너지원으로 재활용하는 단열 압축공기에너지저장(adiabatic CAES) 및 다단계 공기 압축 CAES 시스템을 대상으로 에너지 효율을 평가한 바 있다. 하지만, 이들 연구는 지하 압축공기에너지 저장시설 중에서도 압축공기를 생성하는 지상설비가 주된 관심사로 지하 저장공동의 에너지 효율 분석에의 적용에는 한계가 있다. 田中 외(1998)는 1차원 열확산방정식의 이론해를 이용하여 무복공식 지하 압축공기에너지 저장공동으로부터 주변 암반에의 열손실량을 계산한 바 있다. 저장공동으로부터의 열손실은 열전도(heat conduction)에 의한 손실과 공기 누출에 동반한 열이류(heat advection)에 의한 손실이 동시에 발생하나 이들 연구에서는 열전도에 의한 열손실만을 고려하였다. 또한, 열전도에 의한 열손실량 계산을 위해서는 저장공동 내 온도변화값이 제공되어야 하기 때문에 사전 예측

보다는 운영과정에서의 저장공동 내 온도 계측값을 이용한 열손실량 사후 평가에 유용할 것으로 판단된다. 한편, 복공식 저장공동의 경우, 기밀시스템 구성요소들의 기하학적 복잡성 및 재료 물성의 다양성으로 인하여 이론해의 적용이 곤란할 수도 있다.

본 연구에서는 지하 압축공기에너지 저장공동을 대상으로 열역학적 에너지수지 기본식을 구성하고 수치 해석결과를 이용하여 정량적 에너지수지를 계산함으로써 지하 저장공동의 에너지 효율 분석을 실시하였다. 저장공동 주변 지하수, 압축공기의 복합거동 및 콘크리트 라이닝으로 대표되는 복공재의 열전달 거동 해석은 다상다성분 열유동 해석프로그램인 TOUGH2(Pruess et al., 1999)를 이용하였다. 또한, 압축공기 주입 온도 및 콘크리트 라이닝의 열전도계수를 변화시켜가며 이들 변수가 지하 압축공기에너지 저장공동 에너지효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 지하 압축공기에너지 저장공동의 열역학적 에너지수지 이론

지하 저장공동내부에 저장되는 압축공기의 흐름이 비교적 완만하여 운동에너지 변화량이 충분히 작다고 할 때 저장압축공기의 총에너지(E_c)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_c = \int_{V_c} \rho_e dV = \rho_e e_c V_c \quad (1)$$

여기서, V_c 는 저장공동 내부 부피(m^3), ρ_e 는 압축공기 밀도(kg/m^3), e_c 는 단위 질량 당 내부에너지(J/kg)이다.

지하 저장공동 내부 압축공기의 총에너지 변화량(ΔE_c)은 열역학 제1법칙으로부터 외부로부터의 일(ΔW)과 열전달에 의한 열량 변화(ΔH)의 합에 내부에너지변화량(ΔE)을 더한 형태로 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta E_c = \Delta W + \Delta H + \Delta E \quad (2)$$

여기서, 외부로부터의 일(ΔW)은 압축공기 주입 및 토출과정에서 압축공기가 행한 일(ΔW_m)과 누출에 의한 일(ΔW_l)의 합으로 표시할 수 있다. 내부에너지 변화량(ΔE) 역시 마찬가지로 $\Delta E = \Delta E_m + \Delta E_l$ 로 나타낼 수 있다.

따라서, 식 (2)는 아래 식 (3)과 같이 압축공기의 주입-토출과정과 누출에 의한 변화량성분으로 표시할 수 있다.

$$\Delta E_c = (\Delta E_m + \Delta W_m) - (\Delta E_l + \Delta W_l) + \Delta H \quad (3)$$

여기서, 아랫침자 m 은 저장공동에 연결된 파이프라인을 통한 압축공기의 유출입과정에서의 공기유동(air migration)을 나타내고, l 은 저장공동으로부터 콘크리트 라이닝을 통하여 유출되는 공기누출(air leakage)을 나타낸다. 또한, 열량변화(ΔH)는 열전도에 의한 성분(ΔH_c)과 열이류에 의한 성분(ΔH_u)으로 세분할 수 있다.

압축공기 주입-압축과 토출 팽창과정에서의 저장공동의 부피변화를 무시할 때, 저장공동 내 압축공기의 내부에너지변화량(ΔE)은 비열, 온도 및 공기질량의 함수로 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta E = C_{air} \cdot T \cdot m \quad (4)$$

여기서, C_{air} 는 공기의 정적비열($=716 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$, specific heat at constant volume), T 는 공기온도($^\circ\text{K}$), m 은 공기유동질량(kg/s)이다.

압축공기 주입 및 토출과정에서 압축공기가 행한 일(ΔW)은 공기압력 및 부피의 함수로 이상기체방정식으로 부터 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\Delta W = P \cdot V = R_{air} \cdot T \cdot m \quad (5)$$

여기서, P 는 공기압력(Pa), V 는 공기부피(m^3), R_{air} 는 기체상수($=286.9 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$)이다.

식 (4) 및 식 (5)를 식 (3)에 대입하고 정리하면 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지수지 기본식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_{air}}{R_{air}} V_c \frac{\partial P_c}{\partial t} = (C_{air} + R_{air}) T_m m_m - (C_{air} + R_{air}) T_l m_l + \Delta H \quad (6)$$

여기서, T_m 은 압축공기 주입 및 토출과정에서의 온도($^\circ\text{K}$), T_l 은 누출공기온도로 토출 및 누출 공기온도는 저장공동 내 공기온도(T_c)와 동일한 것으로 가정한다. 주입과정에서의 압축공기 온도는 설계 입력값으로 21°C ($=294.15 \text{ }^\circ\text{K}$)을 설정하였다.

본 연구에서는 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동을 대상으로 TOUGH2를 이용한 다상(multi-phase) 다 성분(multi-components) 열유동 해석을 실시하고 그 결

과를 이용하여 식 (6)의 각 성분을 계산함으로써 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지수지 분석 및 효율 평가를 실시하였다.

3. 수치해석을 통한 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지수지 분석 및 민감도 해석

3.1 해석모델 및 해석조건

복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 운영과정에서의 에너지 손실은 크게 내부 압축공기의 누출에 의한 손실과 저장공동 내 온도와 콘크리트 라이닝 및 주변 암반과의 온도차이에 의해 발생하는 열전달에 의한 손실로 설명할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 다상 다성분 열유동 거동을 시뮬레이션할 수 있는 TOUGH2(Pruess et al., 1999) 코드를 이용하여 지하 압축공기에너지 저장공동 주변 누출 및 열전달 해석을 실시하고 전술한 식 (6)의 에너지수지 기본식을 구성하는 각 항을 계산하였다.

해석에 사용된 모델은 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 기밀성능 평가 및 기밀시스템 설계변수가 누출 거동에 미치는 영향을 분석한 기존 연구(김형목 외, 2011)와 동일하고 Figure 1과 같다.

원형 2차원 단면 형상의 압축공기에너지 저장공동은 지하 심부 100 m에 위치하고 복공재로서 두께 50 cm의 콘크리트 라이닝이 설치되는 것으로 설정하였다. 라이닝 설치 후 저장공동 내부 직경은 5.0 m이고, 라이닝 안쪽면에는 공동 내부 부피에 해당하는 요소부피를 가지는 일렬의 요소를 추가하였다. 이들 추가요소의 공극률과 투과계수를 상대적으로 크게 설정함으로써 저장공동 내 압축공기 주입 및 토출 과정에서의 압력 및 온도변화를 동시에 해석할 수 있음을 이전 연구를 통해 확인한 바 있다(김형목 외, 2011). 이와 달리 저장공동 내부를 해석요소화 할 경우, 저장공동 내부에서의 공기유동 및 열전달 현상을 보다 상세하게 설명할 수 있으나 해석에 소요되는 시간이 크게 증가한다.

초기 조건으로 지표면 온도는 10°C , 온도 구배는 100 m마다 3°C 씩 증가하는 것으로 하고, 지하수면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. 따라서, 지하 압축공기에너지 저장공동 심도에서의 온도 및 지하수압은 각각 13°C 및 1 MPa이다. 저장공동 운영조건 및 재료물성 등의 기타 입력치는 기존 연구(김형목 외, 2011)에 수록된 것과 동일하다. TOUGH2 해석에서는 압축공기 주입 및 토출을 총 10회 반복하고 정량적 에너지수지 분석은 이 중 5번째 과정을 대상으로 실시하였다. Figure 2는 이러한 저장공동 운영과정에서의 온도변화 양상을 나타낸다. 압축공기 주입 및 압축 과정(Figure 2(b)에서

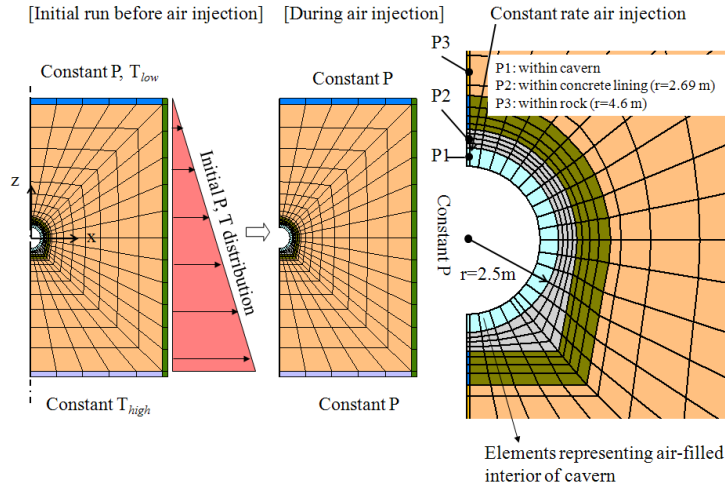


Fig. 1. Model grid for TOUGH2 analysis of underground lined rock caverns for CAES.

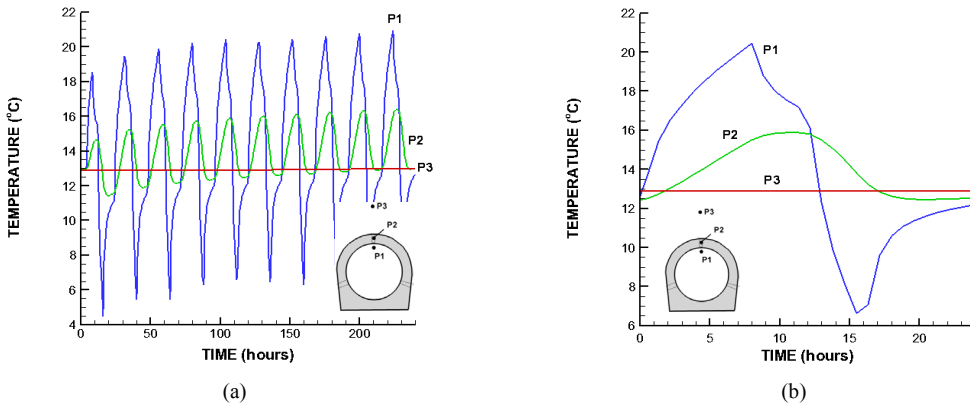


Fig. 2. Calculated evolution of temperature during daily compression and decompression phase (a) for total 10 cycles, and (b) for the 5th cycle (See Figure 1 for the exact locations of P1: within cavern, P2: concrete linings, and P3: rock mass)

0-12 hours 구간)에서는 저장공동 내부 온도가 콘크리트 라이닝 온도보다 상대적으로 높다. 반대로 토출 및 팽창과정(Figure 2(b)의 12-24 hours 구간)에서는 저장공동 내 압축공기의 온도가 급격히 감소하여 콘크리트 라이닝의 온도가 더 높은 것을 알 수 있다. 한편, 저장공동 내 압력 변화와는 무관하게 주변 암반에서의 온도 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다.

3.2 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지효율 분석

Figure 3은 압축공기 주입 및 토출을 총 10회 반복하는 동안의 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지수지 식 (6)의 각 항을 계산한 결과이다. 앞서 언급한대로

정량적 에너지수지 분석은 이중 5번째 주입-토출 과정을 대상으로 실시하였다(Figure 4). 따라서, Figure 4는 Figure 3의 5번째 주입-토출 과정을 확대 표현한 것이다. Figure 4(a)는 저장공동 내 에너지변화량으로 식 (6)의 좌변에 해당한다. 이는 수치해석 결과로 얻어진 저장공동 내 압력변화량으로부터 계산할 수 있을 뿐만 아니라 이상기체방정식을 이용하여 저장공동 내 압축공기의 온도 및 질량변화량을 이용하여 $C_{air} T_c \Delta m_c$ 와 같이 계산 가능하다. Figure 4(b)는 우변 첫번째 항에 해당하는 저장공동 내 압축공기의 주입 및 토출에 의한 에너지변화량으로 주입질량은 $2.2 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$, 토출질량은 $4.4 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ 이 사용되었으며 주입 온도(T_m)는

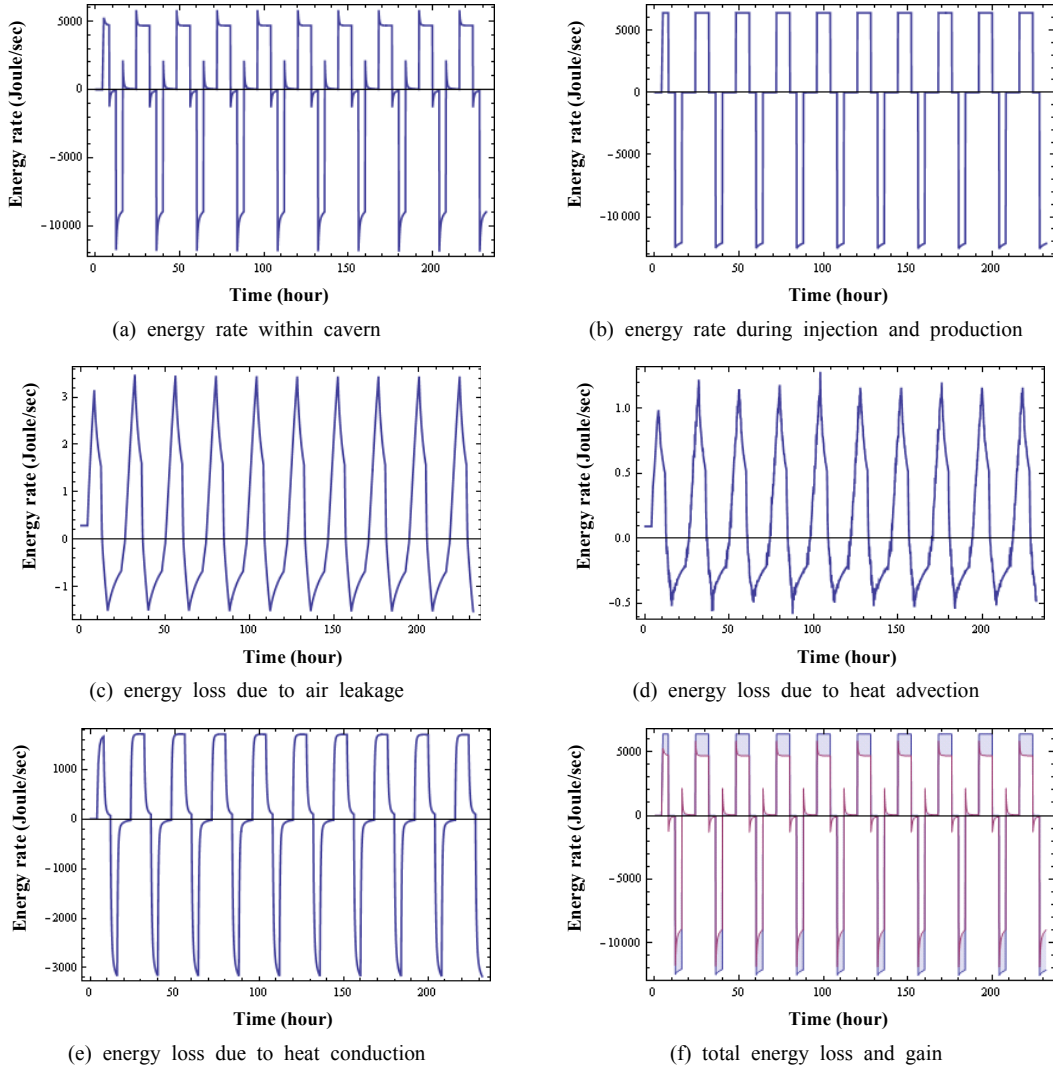


Fig. 3. Calculated energy balance terms for total 10 cycles of compression and decompression in CAES

21°C ($= 294.15^{\circ}\text{K}$), 토출온도(T_m)는 수치해석결과로 얻어지는 저장공동 내 온도와 동일한 값을 이용하였다. 토출과정에서는 저장공동 내 압력 및 온도 감소로 인해 토출에너지가 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

Figure 4(c)는 저장공동으로부터 누출되는 공기로 인한 에너지 손실량으로 식 (6)의 우변 두 번째 항에 해당한다. 누출공기질량(m_l) 및 누출공기온도(T_l)은 모두 수치해석결과로 얻을 수 있으며 누출공기온도는 저장공동 내 공기온도(T_c)와 동일하다. 저장공동 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 라이닝의 투과계수가 클수록 누출공기질량은 증가한다. 본 해석에서는 콘크리트 라이닝 투과

계수로 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 를 설정하였다. 기존 연구결과(김형목 외, 2011)에 의하면 콘크리트 라이닝 투과계수가 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 이하일 경우, 주변 암반의 투과계수에 상관없이 누출공기질량이 총 저장질량의 1% 이하로 유지되기 때문에 누출공기질량에 따른 에너지손실량은 주입질량에 비해 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 보인다.

Figure 4(d) 및 4(e)는 저장공동 내 공기온도와 콘크리트 라이닝 온도차이에 의해 발생하는 열손실을 나타낸다. 열손실은 공기 누출에 의한 열이류 성분과 열전도에 의한 성분으로 구성된다. Figure 4(d)는 열이류에 의한 에너지변화양상으로 공기누출과정에서의 질량손실

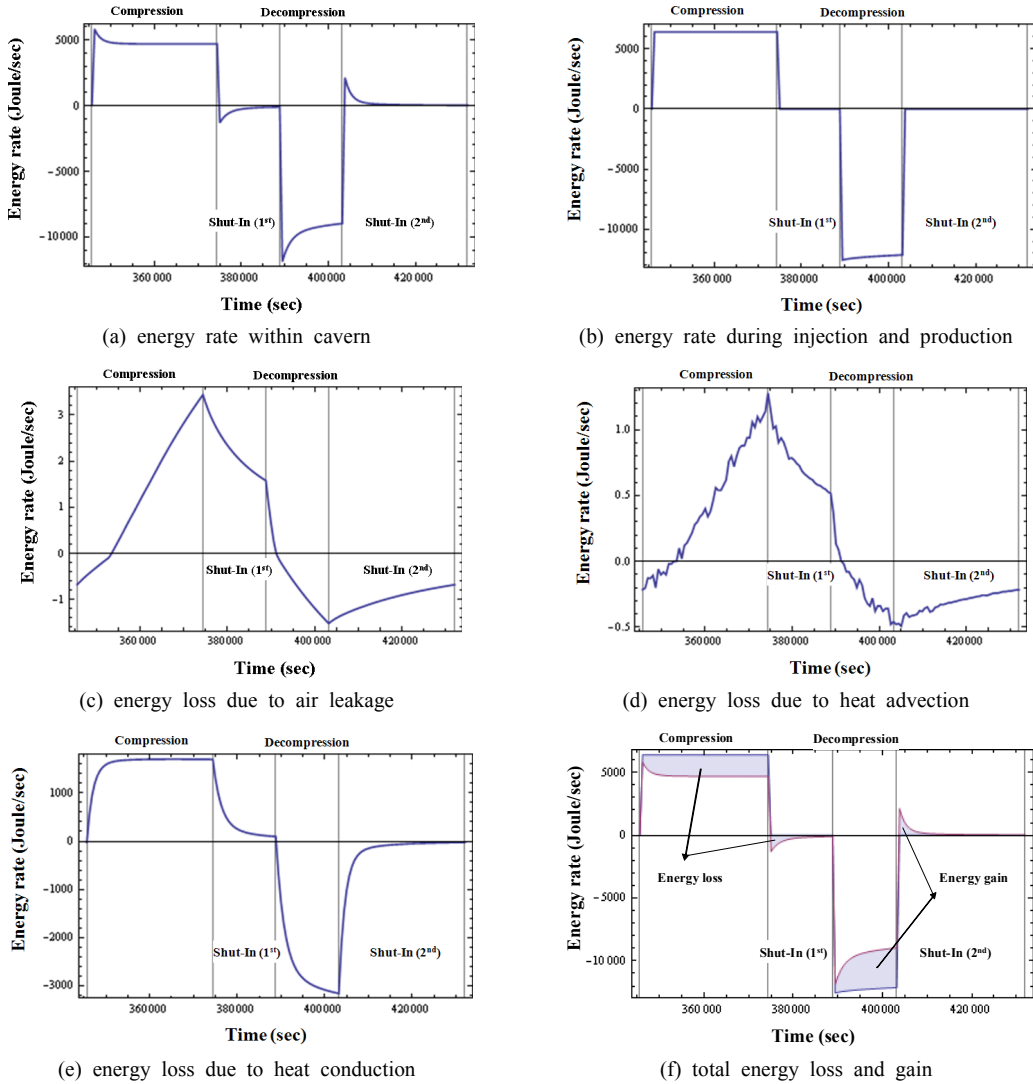


Fig. 4. Calculated energy balance terms for the 5th cycle of compression and decompression in CAES

에 의한 에너지변화(Figure 4(c))와 동일한 양상을 보임을 알 수 있다. Figure 4(e)는 열전도에 의한 열손실로 주입압축과정에서는 저장공동으로부터 라이닝으로 열손실(+)이 발생하고 토출팽창과정에서는 주변 암반 및 라이닝으로부터 저장공동으로 열유입(-)이 발생함을 알 수 있다. 또한, 열전도에 의한 열에너지 유출입량은 누출에 의한 에너지손실보다 훨씬 큰 값을 보인다. 따라서, 콘크리트 라이닝의 투과계수가 충분히 낮고 저장공동의 기밀성능이 확보되는 경우에는 저장공동 주변 에너지 유출입의 대부분은 열전도에 의해 발생함을 알 수 있다.

Figure 4(f)는 주입 및 토출 에너지와 저장공동 내부

에 저장되는 에너지를 나타낸 것으로 그림에서 빗금친 부분은 총에너지 유출입량으로 Figure 4(c)-(e)와 같다.

Table 1은 지하 압축공기에너지 저장공동의 정량적 에너지수지 분석을 위해 식 (6) 및 Figure 4에 제시된 에너지 변화량을 시간적분한 결과이다. Table 1의 에너지 손실량(energy loss)에서 양의 값(+)은 저장공동으로부터 주변 콘크리트 라이닝 및 암반으로의 에너지 손실을, 음의 값(-)은 반대로 저장공동으로의 에너지 유입을 나타낸다. 주입압축과정(compression phase)은 8시간의 주입과 연이은 4시간의 shut-in 과정을 말하고, 토출팽창과정은 4시간의 토출과 이후의 8시간의 shut-in 과정을 포함한다.

Table 1. Calculated time-integrated energy balance terms for the 5th cycle of compression and decompression in CAES.

Phases	Energy balance term	Value
Compression	Total injected energy, E_{m_i} (Joule)	1.84×10^8
	Total energy change in the cavern, E_c (Joule)	1.32×10^8
	Energy loss by air leakage, E_l (Joule)	3.82×10^5
	Energy loss by heat advection, H_a (Joule)	2.20×10^4
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	5.15×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	5.19×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	0.28
Decompression	Total produced energy, E_{m_p} (Joule)	-1.76×10^8
	Total energy change in the cavern, E_c (Joule)	-1.32×10^8
	Energy loss by air leakage, E_l (Joule)	-3.70×10^4
	Energy loss by heat advection, H_a (Joule)	-1.21×10^4
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	-4.40×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	-4.40×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	0.24
Overall energy loss against total injected energy (-)		0.04
Min. temperature during the cycle ($^{\circ}\text{C}$)		5.6
Max. temperature during the cycle ($^{\circ}\text{C}$)		20.2

(In this case, air injection temperature was 21°C , and thermal conductivity of concrete linings was $3.0 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{K}$)

따라서, 정량적 에너지수지 분석은 주입압축 및 토출팽창과정 모두 12시간을 대상으로 계산하였다. Table 1에서 compression 과정에서 약 28% ($= (E_l + H_a + H_c)/E_{m_i} \times 100\% = 5.19 \times 10^7 / (1.84 \times 10^8) \times 100\%$)의 에너지가 공기누출 및 열손실에 의해서 유출되지만, decompression 과정에서 약 24% ($= (4.40 \times 10^7) / (1.84 \times 10^8) \times 100\%$)의 에너지가 저장공동으로 유입되어 전체적으로는 약 4%의 에너지 손실이 발생함을 알 수 있다. 또한, compression 과정에서의 에너지 손실의 주된 원인은 콘크리트 라이닝 및 주변 암반으로의 열손실($H_a + H_c$)로 공기누출에 의한 에너지 손실량(E_l) 보다 약 100배 이상 큰 것으로 계산되었다. 따라서, 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지 효율 향상을 위해서는 콘크리트 라이닝의 투과 특성뿐만 아니라 열전달 특성의 파악 및 평가를 통한 저장공동의 설계시공이 이루어져야 할 것이다.

3.3 압축공기 주입온도가 지하 압축공기에너지 저장 공동 에너지효율에 미치는 영향

압축공기의 주입온도가 지하 저장공동 에너지효율에 미치는 영향을 살펴볼 목적으로 주입온도를 변화시켜가며

정량적 에너지수지 분석을 실시하였다. Table 2는 주입온도를 21°C 에서 13°C 로 낮추었을 경우와 31°C 및 46°C 로 증가시켰을 경우의 결과를 요약한 것이다. TOUGH2 해석에서의 주입온도(T)는 압축공기의 엔탈피(enthalpy)의 함수로 $T = h - 273.15 \times R_{air}/C_p$ 와 같이 나타내어진다. 여기서, h 는 비엔탈피(specific enthalpy, J/kg), C_p 는 정압 비열(specific heat at constant pressure)로 $C_p = C_{air} + R_{air}$ 와 같다.

Table 2에서 주입온도를 낮출수록 에너지 손실량은 감소하여 주입온도 13°C 의 경우, 주입압축과정에서 저장공동 외부로 유출된 대부분의 에너지가 토출팽창과정에서 유입되어 에너지 손실율은 약 1%로 계산되었다. 반대로, 주입온도를 증가시킬수록 외부로의 열전도량이 증가하고 결과적으로 에너지 손실율이 커지는 결과를 보였다. 이는 저장공동 주변 초기온도분포의 영향으로 본 연구에서는 지표면 온도 10°C 에 온도구배를 $3^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 로 설정하였기 때문에 저장공동이 위치하는 100 m 심도에서의 암반 내 초기온도가 압축공기 주입 온도에 근사하여 저장공동과의 온도구배가 상대적으로 작게 형성되기 때문으로 판단된다. 따라서, 지하 압축공

Table 2. Calculated time-integrated energy balance terms for the 5th cycle of compression and decompression in CAES for different injection temperatures.

Phases	Energy balance term	Injection temperature		
		13°C	31°C	46°C
Compression	Total injected energy, E_{m_i} (Joule)	1.79×10^8	1.90×10^8	1.99×10^8
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	4.67×10^7	5.70×10^7	6.54×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	4.68×10^7	5.71×10^7	6.55×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	0.26	0.30	0.33
Decompression	Total produced energy, E_{m_p} (Joule)	-1.76×10^8	-1.77×10^8	-1.78×10^8
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	-4.40×10^7	-4.38×10^7	-4.36×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	-4.41×10^7	-4.38×10^7	-4.36×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	-0.25	-0.23	-0.22
Overall energy loss against total injected energy (-)		0.01	0.07	0.11
Min. temperature during the cycle (°C)		4.9	6.5	7.8
Max. temperature during the cycle (°C)		19.1	21.6	23.6

Table 3. Calculated time-integrated energy balance terms for the 5th cycle of compression and decompression in CAES for different thermal conductivity of concrete linings.

Phases	Energy balance term	Thermal conductivity
		30 J/s · m · °K
Compression	Total injected energy, E_{m_i} (Joule)	1.84×10^8
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	5.45×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	5.46×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	0.30
Decompression	Total produced energy, E_{m_p} (Joule)	-1.78×10^8
	Energy loss by heat conduction, H_c (Joule)	-4.85×10^7
	Total energy loss, $E_l + H_a + H_c$ (Joule)	-4.85×10^7
	Total energy loss against total injected energy, $(E_l + H_a + H_c/E_{m_i})$ (-)	-0.26
Overall energy loss against total injected energy (-)		0.04
Min. temperature during the cycle (°C)		10.2
Max. temperature during the cycle (°C)		16.0

기에너지 저장공동의 에너지효율 관점에서는 주입온도를 저장공동 주변 초기온도분포와 유사하게 설계하는 것이 유리하다고 할 수 있다. 그러나, 본 에너지효율 분석은 지하저장공동만을 대상으로 한 결과로 공기 압축 과정에서 발생하는 고온의 압축공기를 냉각시키는 과정에서 추가적인 에너지 소비가 요구되기 때문에 지상 설비까지 고려할 경우 상이한 에너지수지 분석결과를 보일 수도 있다.

3.4 콘크리트 라이닝의 열전도특성이 압축공기에너지 저장공동 에너지효율에 미치는 영향

복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 라이닝의 열전도특성이 저장공동 에너지효율에 미치는 영향을 살펴볼 목적으로 라이닝 열전도계수를 변화시켜가며 정량적 에너지수지를 계산해 보았다.

Table 1은 압축공기 주입온도 21°C에 저장공동 주변

암반의 초기온도 13°C의 조건에서 콘크리트 라이닝의 열전도계수를 3.0 $J/s \cdot m \cdot ^\circ K$ 로 설정한 결과이다. 동일한 온도 조건에서 콘크리트 라이닝의 열전도계수를 2.5 $J/s \cdot m \cdot ^\circ K$ 이하로 했을 경우, 토출팽창 과정(decompression phase)에서 저장공동 내 압축공기 온도가 영하로 내려가 수치계산이 불가능하였다. 따라서, Table 3에서는 라이닝 열전도계수를 30 $J/s \cdot m \cdot ^\circ K$ 로 증가시켰을 경우의 결과만을 정리하였다. 라이닝의 열전도계수가 수치적 안정성이 확보되는 최소값인 2.5 $J/s \cdot m \cdot ^\circ K$ 인 경우, Table 1과 동일한 결과를 보였다.

콘크리트 라이닝의 열전도계수를 증가시켰을 경우, 열전도에 의한 열손실량의 절대값은 증가하지만 열유입량도 이에 비례하여 증가하기 때문에 전체 에너지 손실율은 4%로 동일하여 에너지효율 측면에서의 변화는 없는 것으로 확인되었다. 한편, 저장공동 운영과정에서의 저장공동 내 온도변화폭은 15°C(Table 1)에서 라이닝 열전도계수를 증가시켰을 때 6°C 정도로 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지수지 기본식을 구성하고 다상다성분 열유동 해석결과를 이용하여 지하 저장공동의 열역학적 에너지수지 분석을 통한 에너지 효율 평가를 실시하였다.

지하 압축공기에너지 저장공동의 에너지 효율은 압축공기 주입온도에 민감하고 설계 주입온도 21°C 조건에서 복공재인 콘크리트 라이닝의 열전도 특성과는 무관한 결과를 보였다. 콘크리트 라이닝이 충분한 기밀성능을 발휘할 경우, 저장공동으로부터의 에너지 손실 대부분은 콘크리트 라이닝 및 주변 암반에의 열전도를 통해 발생함을 확인하였다. 또한, 주입 압축공기 온도가 저장공동 주변 온도와 유사할 경우 주입-압축 과정에서 손실된 에너지의 대부분이 저장공동으로 재유입됨을 확인하였다.

본 연구에서 소개된 지하 압축공기에너지 저장공동의

에너지수지 분석기법은 다양한 형태의 압축공기 지하 저장방식의 열역학적 안정성 평가에 적용가능하며, 지하 저장공동 운영과정에서의 최적 주입-토출조건의 설계 및 사전 평가를 통해 지하 압축공기에너지 저장시스템의 에너지 효율 향상에 기여할 수 있을 것이다. 또한, 압축공기에너지 지하저장뿐만 아니라 탄화수소에너지 및 미래 수소에너지 등과 같은 다양한 에너지원을 대상으로 한 지하저장공동의 에너지효율 평가에도 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다. TOUGH2 해석 과정에 도움을 주신 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory의 Dr. Rutqvist와 논문완성도 향상에 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김형목, Jonny Rutqvist, 류동우, 선우춘, 송원경, 2011, 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 기밀시스템 설계 변수의 민감도 해석, 터널과 지하공간, 21(4), pp. 287-296.
2. 한국지질자원연구원, 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발, 지식경제부, GP2009-019-2009(1), 2009.
3. 한국지질자원연구원, 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발, 지식경제부, GP2009-019-2010(2), 2010.
4. 田中雅夫, 山地宏志, 中山昭彦, 櫻井春輔, 志田原巧, 1998, 壓縮空氣エネルギー貯蔵に關する熱力學的考察, 土木学会論文集 No. 610/ III-45, pp. 31-42.
5. Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., TOUGH2 User's Guide Version 2.0, LBNL-43134, 1999.
6. Succar S. Williams, R.H., Compressed air energy storage: Theory, resources and applications for wind power, Princeton Environmental Institute (PEI), Princeton University, 2008



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 지구환경연구본부 선임연구원

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 선임연구원

송원경

1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1966년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3247
 E-mail: songwk@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



박도현

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3911
 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 선임연구원

