

## 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 기밀시스템 설계변수의 민감도 해석

김형목<sup>1)</sup>, Jonny Rutqvist<sup>2)</sup>, 류동우<sup>1)\*</sup>, 선우춘<sup>3)</sup>, 송원경<sup>3)</sup>

### Sensitivity Analysis of Design Parameters of Air Tightness in Underground Lined Rock Cavern (LRC) for Compressed Air Energy Storage (CAES)

Hyung-Mok Kim, Jonny Rutqvist, Dong-Woo Ryu, Choon Sunwoo, Won-Kyong Song

**Abstract** We performed a numerical modeling study of thermodynamic and multiphase fluid flow processes associated with underground compressed air energy storage (CAES) in a lined rock cavern (LRC). We investigated air tightness performance by calculating air leakage rate of the underground storage cavern with concrete linings at a comparatively shallow depth of 100 m. Our air-mass balance analysis showed that the key parameter to assure the long-term air tightness of such a system was the permeability of both concrete linings and surrounding rock mass. It was noted that concrete linings with a permeability of less than  $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  would result in an acceptable air leakage rate of less than 1% with the operational pressure range between 5 and 8 MPa. We also found that air leakage could be effectively prevented and the air tightness performance of underground lined rock cavern is enhanced if the concrete lining is kept at a higher moisture content.

**Key words** Compressed air energy storage (CAES), Lined rock cavern (LRC), Air tightness performance, Air leakage rate, Mass balance analysis

**초 록** 본 연구에서는 압축공기에너지 지하저장을 위한 복공식 암반공동의 기밀성능을 평가할 목적으로 다상 유체 열유동 해석을 수행하였다. 기밀성능은 저장공동으로부터 누출되는 공기질량으로 평가하였으며, 저장공동 내부에 콘크리트 라이닝 기밀시스템을 설치하고 저장공동은 비교적 천심도인 지하 100m 심도에 위치하는 것으로 가정하였다. 저장공동 내 질량수지분석 결과, 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 투과계수가 누기량 및 저장공동의 장기적 기밀성능에 미치는 영향이 큰 것으로 파악되었으며 콘크리트 라이닝의 투과계수가  $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  이하 일 경우, 저장공동 운영압력이 5 MPa에서 8 MPa 사이일 때 누기량은 1%이하 인 것으로 계산되었다. 또한, 콘크리트 라이닝의 초기포화도에 따른 공기누출량 계산결과, 라이닝 수분포화도를 증가시킬수록 누기량은 감소하고 저장공동 기밀성능이 향상됨을 확인하였다.

**핵심어** 압축공기에너지저장, 복공식 암반공동, 기밀성능, 누기량, 질량수지분석

## 1. 서 론

대용량 전력저장기술로서 잉여전력을 이용하여 전력

에너지를 압축공기로 변환하여 지하공동에 저장해 두었다가, 필요시 저장 압축공기에너지로 가스 터빈 등을 구동하여 전력에너지를 공급하는 압축공기에너지저장 (compressed air energy storage, CAES) 기술이 최근 주목을 받고 있다. 압축공기를 저장하는 지하저장공동은 콘크리트 라이닝으로 대표되는 기밀시스템의 설치 유무에 따라 복공식과 무복공식으로 구분될 수 있다(김형목 외, 2009). 복공식 압축공기 지하저장공동에서는 무복공식에서 예상되는 암반 균열을 통한 저장압축공기의 누출을 방지하기 위하여 콘크리트 라이닝을 포함

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

<sup>2)</sup> Staff Scientist, Lawrence Berkeley National Laboratory

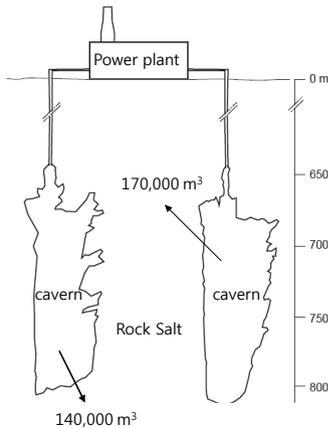
<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

\* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2011년 4월 1일

심사 완료일 : 2011년 4월 14일

게재 확정일 : 2011년 7월 4일



**Fig. 1.** Storage cavern depth and volume in Huntorf CAES plant

한 기밀시스템을 설치하여 기밀성을 담보하고 동시에 저장공동의 역학적 안정성을 도모하게 된다.

현재 상업화되어 운영되고 있는 CAES 시설로는 독일 Huntorf와 미국 Alabama주 McIntosh 사례가 잘 알려져 있다. 독일 Huntorf의 지하저장공동은 지하심부 약 600m에 저장용량 310,000 m<sup>3</sup>로 설치되었으며(Figure 1, Table 1), 미국 McIntosh는 심부 450 m에 500,000 m<sup>3</sup>의 저장공동이 위치한다. 이들 저장공동은 모두 압염층에 용해 채굴(solution mining)을 이용하여 형성된 공동으로 압염층의 치밀한 구조적 특성으로 별도의 기밀시스템을 설치하지 않고 운영되었다(Pepper, 2008).

그러나, 국내에서는 이러한 지질구조를 찾기 어렵고 주변 수압을 이용하여 기밀성을 확보하는 무복공식 저장공동은 설치심도가 수백 m에 달하기 때문에 막대한 공사비용이 예상된다. 따라서, CAES 기술의 성공적인 국내적용을 위해서는 얇은 심도에서 기밀성능을 보장할 수 있는 저장공동의 설치운영이 요구된다. 이를 위해서는 복공식 기밀시스템 구성요소의 개별 특성이 저장공동 기밀성능에 미치는 영향을 사전에 충분히 파악하기 위하여 수치해석을 통한 기밀성능 예측 및 운영과정에서의 거동을 평가하는 것이 중요하다.

Jessica(2006)는 독일 Huntorf CAES 운영과정에서의 저장공동 내 압력 거동을 설명하기 위하여 저장공동 주변 지하수와 압축공기의 2상(two-phase) 유체유동을 Eclipse100™ 코드를 이용하여 재현하고 압축공기 지하저장공동의 기밀성능 예측에 사용가능함을 보인 바 있다. 국내에서는 동일한 코드를 이용하여 박완문 등(2010)이 압축공기에너지 지하저장 과정에서의 주요 영향인자 파악을 목적으로 동일한 해석코드를 이용한 1차

**Table 1.** Specification of Huntorf CAES plant

<b>Output</b>	
• turbine operation	290 MW ( $\leq 3$ hrs)
• compressor operation	60 MW ( $\leq 12$ hrs)
<b>air flow rates</b>	
• turbine operation	417 kg/s
• compressor operation	108 kg/s
air mass flow ratio in/out	1/4
number of air caverns	2
air cavern volumes (single)	= 140,000 m <sup>3</sup> = 170,000 m <sup>3</sup>
total cavern volume	= 310,000 m <sup>3</sup>
cavern location -top	650 m
-bottom	800 m
maximum diameter	60 m
well spacing	220 m
<b>cavern pressure</b>	
• minimum permissible	1 bar
• minimum operational (exceptional)	20 bar
• minimum operational (regular)	43 bar
• maximum permissible & operational	70 bar
maximum pressure reduction rate	15 bar/h

원 해석모델을 적용하여 지질학적 구조 및 물리적 특성이 저장효율에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 이들 연구에서의 누출거동평가는 저장공동 내 질량수지분석을 통한 누출량 산정이 아닌 초기 저장압력대비 공기누출에 따른 압력감소비율로 저장효율을 평가하였기 때문에 실제 압축공기 주입/생산에 따른 누출량 추정 및 저장효율 평가는 이루어지지 않았다. 이외에도 김택곤 등(2008)은 국내 전력 현황 및 심야전력 환경변화 등을 고려한 CAES의 국내타당성 및 활용방안에 대해 검토한 바 있으며 이연규 등(2010)은 압축공기 저장공동 콘크리트 라이닝의 역학적 안정성에 대한 수치해석 결과를 소개한 바 있다.

본 연구에서는 다상 다성분 열유동 거동을 모사할 수 있는 TOUGH2(Pruess et al., 1999) 프로그램을 이용하여 지하 압축공기에너지 저장을 위한 2차원 원형공동 주변 누출 거동을 해석하고, 라이닝 투과계수 등의 복공식 기밀시스템의 설계변수가 누출량 변화에 미치는 영향에 대한 수치해석적 검토를 실시함으로써 향후 압축공기에너지 지하저장시설 구축에 필요한 기초자료를 확보하는데 그 목적을 두었다. TOUGH2는 이산화탄소 지중저장(Pruess and Spycher, 2006), 방사성 폐기물 심지층 처분(Wu et al., 2002), 심부 지열에너지 개발(Battistelli, 1997) 등과 같은 심부지하에서의 복잡한 다

상 다성분 유체유동 문제에 적용된 바 있으나, 압축공기에너지 지하저장예의 적용사례는 보고된 바 없다. TOUGH2 해석결과는 저장공동과 주변 콘크리트 라이닝 및 암반 온도차이에 의해 발생하는 열전달에 의한 열역학적 에너지수지분석도 가능하나 본 논문에서는 저장공동으로부터의 압축공기 누출량 계산을 위한 질량수지 분석만을 다루었다. 또한, TOUGH2는 FLAC3D(Itasca, 2009)와의 연계해석을 통해 향후 저장공동의 역학적 안정성 평가에도 확장 적용가능할 것으로 기대된다.

## 2. 질량수지이론

이상기체 상태방정식을 이용하여 특정 저장온도 및 압력조건에서 저장공동 내부에 저장되는 총 공기질량은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$m_c = \frac{P_c V_c}{R_{air} T_c} \quad (1)$$

여기서  $m_c$ 는 저장공동 내 압축공기 질량(kg),  $P_c$ 는 저장공동 내 압축공기 압력(Pa),  $V_c$ 는 저장공동 내부 총 부피(m<sup>3</sup>),  $R_{air}$ 는 압축공기 기체상수(286.9 J/kg K°),  $T_c$ 는 저장공동 내 압축공기 온도(K°)를 나타낸다.

질량보존의 법칙으로부터 압축공기 저장공동 내부에 저장되는 공기질량은 공급공기질량( $m_s$ )과 누출공기질량( $m_l$ )의 차이로 식 (2)와 같이 표시된다.

$$m_s - m_l = \frac{d(\rho_c V_c)}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_c$ 는 압축공기 밀도를 나타낸다.

이상기체 상태방정식으로부터 압축공기밀도  $\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{P_c}{R_{air} T_c}$ 이므로 저장공동 내부 공기질량증분( $\Delta m_c$ )는 압력과 온도의 함수로 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\Delta m_c = \frac{V_c P_c}{R_{air} T_c} \left( \frac{\Delta P_c}{P_c} - \frac{\Delta T_c}{T_c} \right) \quad (3)$$

이때, 저장공동 내 총 부피( $V_c$ )는 일정한 것으로 가정한다.

압축공기 누출에 따른 저장공동 내 온도 및 압력 변화는 시간경과에 따른 비선형적 거동을 보이나 누출질

량은 두 시점에서의 질량차로 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{V_c}{R_{air}} \left( \frac{P_c^1}{T_c^1} - \frac{P_c^2}{T_c^2} \right) \quad (4)$$

여기서, 윗첨자 1, 2는 각각 이전상태와 현재상태를 나타낸다.

## 3. 해석개요

복공식 지하 저장공동 내부의 압축공기가 누출될 경우 주변 콘크리트 라이닝 및 암반의 지하수를 밀어내면서 이동하게 된다. 따라서, 지하 압축공기 저장공동 주변 누출양상의 파악을 위해서는 콘크리트 및 암반 내의 지하수 및 압축공기가 혼재하는 다상 다성분(multi-phase and multi-components) 유체거동을 모사할 수 있는 해석모델이 요구된다. 또한, 저장공동 내 공기 압축 및 팽창 과정에서 발생하는 저장공동 내 온도변화와 주변 콘크리트 및 암반의 온도차이에 의한 열유동이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 다상 다성분 열유동 거동을 모사할 수 있는 TOUGH2 프로그램을 이용하여 지하 압축공기에너지 저장공동 주변 누출 거동을 해석하고, 투과계수로 대표되는 주요 설계변수가 누출량 변화에 미치는 영향을 검토하였다. 본 해석에서는 TOUGH2 코드 의 다양한 상태방정식(Equation of State, EOS) 중 물공기를 대상으로 비등온(non-isothermal) 해석을 지원 하는 EOS3 모듈을 사용하였다.

### 3.1 해석모델

본 연구에서는 원형 2차원 단면 형상을 가지는 지하 압축공기에너지 저장공동을 대상으로 Figure 2와 같은 해석모델을 이용하여 TOUGH2 해석을 실시하였다. 원형 저장공동의 직경은 5 m, 콘크리트 라이닝 두께는 50 cm, 라이닝 배면에는 1 m의 암반손상영역(Excavation Disturbed Zone, EDZ)을 설정하였다.

저장공동 내부는 공동 내부 부피에 해당하는 요소부피를 가지는 특이 요소를 배치하고 이들 요소에는 공극률과 투과계수가 상대적으로 큰 값을 설정하였다. 이를 통해 압축공기 주입·배출, 공동내부에서의 압축공기 유동 및 콘크리트 라이닝에의 누출에 따른 압력 및 온도 변화를 동시에 모사할 수 있다. 또한, 이들 특이 요소의 공동 내부방향의 변위를 구속할 경우, 고압의 압축공기가 콘크리트 라이닝에 미치는 압력을 재현할 수 있고 이는 저장공동의 역학적 변형 및 누출거동과의 연계해석에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

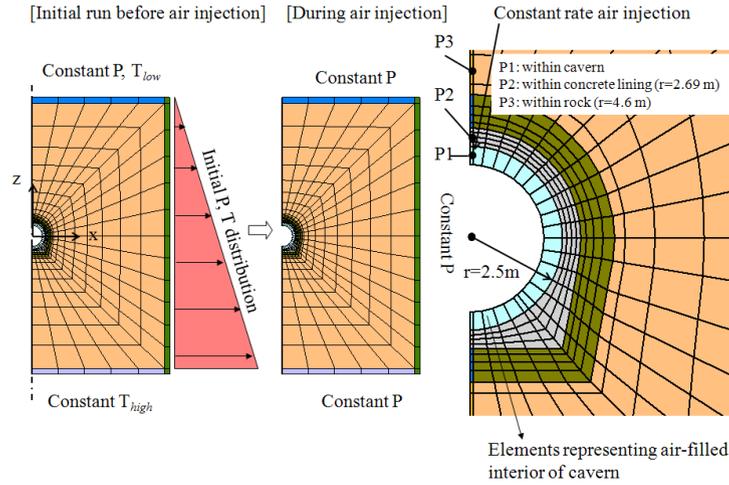


Fig. 2. Model grid for TOUGH2 simulations of underground lined rock cavern for CAES.

Table 2. Material properties used as a base case for modeling of a lined rock cavern for CAES

Property	Material		
	Rock mass	EDZ	Concrete lining
Young's modulus, E (GPa)	35	35	35
Poisson's ratio, n (-)	0.3	0.3	0.3
Thermal expansion coefficient ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Effective porosity, $f$ (-)	0.01	0.01	0.1
Permeability, $k$ ( $\text{m}^2$ )	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-20}$
Residual gas saturation (-)	0.0	0.0	0.0
Residual liquid saturation (-)	0.01	0.01	0.01
van Genuchten, $P_0$ (MPa)	1.47	1.47	1.47
van Genuchten, $m$ (-)	0.595	0.595	0.595
Thermal conductivity (J/s/m $^{\circ}\text{K}$ )	3	3	3
Specific heat (J/kg $^{\circ}\text{K}$ )	900	900	900

저장공동 운영 중 압력 및 온도변화를 모니터링 할 목적으로 저장공동 내부(P1), 콘크리트 라이닝 내부(P2), 암반 내부(P3)에 각각 관측점을 설정하여 시간경과에 따른 이들 변수들의 변화를 살펴보았다(Figure 2).

3.2 해석조건

해석에 사용된 매질의 주요 물성은 Table 2와 같다. 기본 해석에서는 콘크리트 라이닝, 암반손상영역 및 주변 암반의 물성이 동일한 것으로 설정하였으며, 이후 해석에서는 이들 물성의 변화가 저장공동 기밀성능에 미치는 영향을 질량수지분석을 통한 공기누출량 계산을 통해 살펴보았다. 압축공기 저장공동은 반경 2.5 m의

원형공동으로 지하 100 m 심도에 위치하고 지하수면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. 저장 공동내 공기압력은 압축 저장시 최대 8 MPa, 팽창배출시 최소 5 MPa 범위에서 운영되는 것으로 하였다. 따라서, 저장공동 내 공기압력은 주변 지하수압(약 1 MPa)보다 항상 크기 때문에 공기 흐름은 저장공동 내부로부터 주변 암반으로 누출되는 양상을 보인다.

저장공동 운영조건은 하루 8시간 압축 저장하고 4시간 유지 후, 4시간동안 팽창배출한 후 8시간 유지하는 것으로 설정하였다. 저장공동 내부 축방향 단위부피는  $19.63 \text{ m}^3 (= \frac{\pi}{4} \times (5.0 \text{ m})^2 \times 1.0 \text{ m})$  이고, 주입량은 저장공

동 축방향 단위길이 당  $2.2 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ , 배출량은 주입량의 2배에 해당하는  $4.4 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ 로 설정하였다. 저장공동 경계를 제외한 외곽 영역경계는 일정 온도 및 압력조건으로 설정하였다(Figure 2).

초기 조건으로 지표면 온도는  $10^\circ\text{C}$ , 온도구배는  $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 씩 증가하는 것으로 가정하고, 지하수면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. 따라서, 저장공동 설치심도에서의 온도 및 압력은  $13^\circ\text{C}$  및  $1 \text{ MPa}$ 이다.

저장공동의 굴착공사 중 및 장기 운영과정에서 콘크리트 라이닝의 물포화도는 점차 감소하고 저장공동 주변에는 불포화대가 발생하게 된다. 초기 조건 설정을 위해서 압축 저장 및 배출 팽창 과정을 반복하기 전 운영압력의 평균값에 해당하는  $6.25 \text{ MPa}$ 의 압력이 저장공동 내부에 작용하는 것으로 운영 초기조건을 재현하였다. 이 경우 저장개시 1년 후의 콘크리트 라이닝의 물포화도는 70%(; 가스포화도: 30%)이나 15년 후 물포화

도는 40%(; 가스포화도: 60%)로 감소하였다. 본 연구에서는 이후 총 10회의 압축 저장 및 배출 팽창 과정을 반복하였다.

### 3.3 기본해석

Figure 3은 Table 2의 물성을 이용하여 하루 8시간 압축 저장 및 4시간 배출 팽창 과정에서 저장공동내부(P1), 콘크리트 라이닝(P2), 주변 암반(P3)의 관측점에서 모니터링된 압력 및 온도변화를 나타낸 것이다. 압축공기의 압축 저장에 따라 저장공동 내부 온도가 상승하다가 배출 팽창과정에서 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 반면, 주변 암반에서의 온도 및 압력은 저장공동 내부의 압축 저장 및 배출 팽창 과정에 무관하게 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Figure 4는 해석단면에서의 압력 및 온도 분포를 나타낸 것으로 압력 및 온도 변화는 저장공동 내부 및 콘크리트 라이닝의 일부에서 집중적으로 발생하고 주변

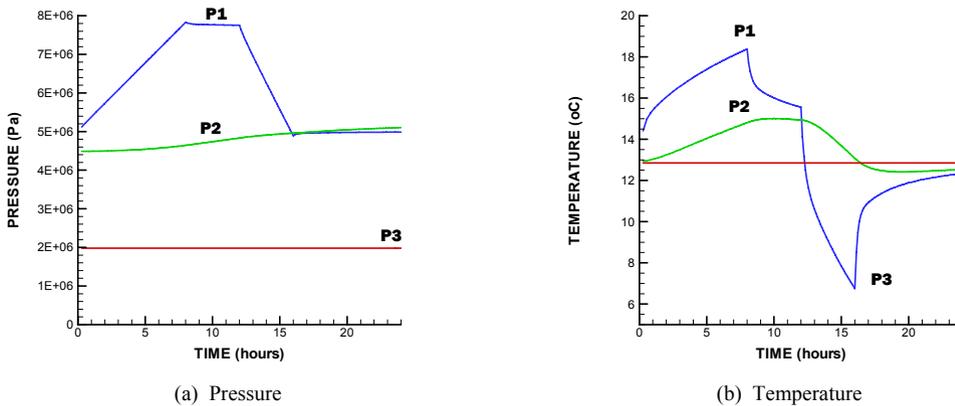


Fig. 3. Calculated (a) pressure and (b) temperature evolution during a daily compression and decompression cycle (P1: within cavern, P2: at concrete lining, P3: at rock mass)

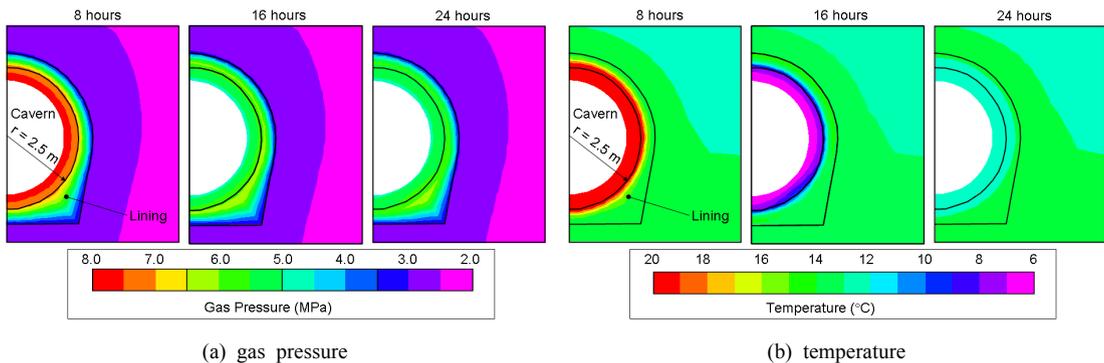


Fig. 4. Calculated (a) gas pressure and (b) temperature evolution during a daily compression and decompression cycle

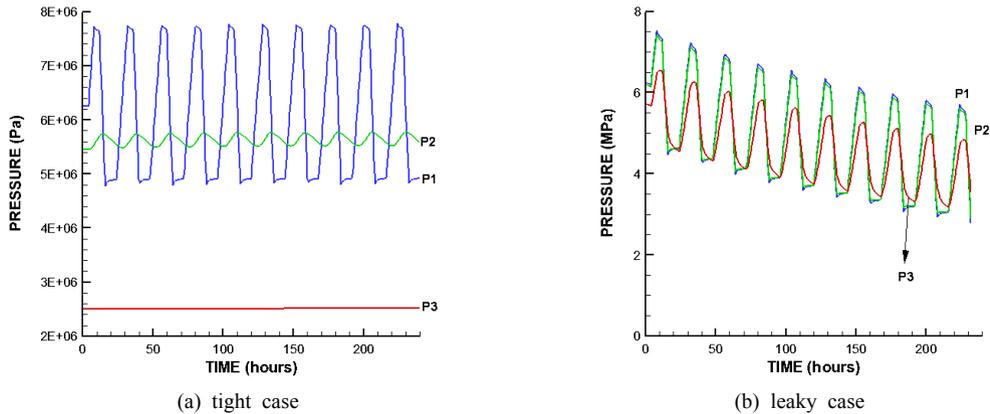


Fig. 5. Calculated pressure evolution during 10 daily compression and decompression cycles (P1: within cavern, P2: at concrete lining, P3: at rock mass)

암반에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이들 압력 및 온도 변화 양상은 콘크리트 라이닝으로 대표되는 기밀시스템 특성 및 압축저장-배출팽창 과정의 반복에 따라 달라질 것으로 예상되어 콘크리트 라이닝 물성이 저장 압축공기의 누출거동에 미치는 영향을 파악할 목적으로 민감도 해석을 실시하였다.

## 4. 해석결과

### 4.1 콘크리트 라이닝 및 주변 암반 투과계수가 저장공동의 기밀성능에 미치는 영향

Figure 5에서는 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 투과특성 변화에 따른 저장공동 내부 압력변화를 비교하였다. 본 고에서는 고유투과계수(intrinsic permeability)를 이용하여 투과특성을 표시하였는데 고유투과계수는 매질의 투과특성을 나타내는 재료상수로 매질의 공극 구조 및 연결성에 좌우될 뿐 매질을 통과하는 유체특성과는 무관하다. 따라서, 압축공기와 주변 지하수가 공존하는 저장공동 주변의 투과특성을 나타내는데 적합할 것으로 판단된다. 고유투과계수와 일반적인 투수계수 사이의 상관성 및 측정기법에 관한 내용은 김형목 외(2010)에 소개된 바 있다.

Figure 5a에서는 콘크리트 라이닝의 투과계수가 기본 해석의 경우(Table 2)보다 저투과성인  $1.0 \times 10^{-20} m^2$ 로, Figure 5b에서는 고투과성인  $1.0 \times 10^{-16} m^2$ 으로 설정하였다. 콘크리트 라이닝이 저투과성인 경우, 저장공동으로부터의 압축공기 누출이 차단되어 저장공동 내 압력이 일정하게 유지되고 기밀성능이 확보됨을 알 수 있

다. 따라서, 암반에 미치는 유체압력의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 반대로, 콘크리트 라이닝의 투과계수가 큰 경우, 압축공기 누출로 인해 압축저장-배출팽창을 반복함에 따라 저장공동 내 압력이 점차로 감소하는 결과를 확인할 수 있다. 또한, 콘크리트 라이닝 내부 압력은 저장공동 압력과 유사한 값을 보였으며 주변 암반의 압력 역시 저장공동 내부 압력과 밀접하게 연계된 거동을 보임을 알 수 있다.

콘크리트 라이닝의 투과특성에 따른 누출량은 저투과성과 고투과성의 경우에 각각  $1.0 \times 10^{-6} kg/s$ 와  $1.04 \times 10^{-3} kg/s$ 으로 추정되었다. 저장공동 내부 압력을 일정하게 유지하기 위해서는 저장공동 축방향 단면 당 압축공기 주입량  $2.2 \times 10^{-2} kg/s$ 에 추정누출량에 해당하는 공기를 추가로 주입하여야 하므로 이 경우 주입량은 각각  $(22 + 1.0 \times 10^{-3} \times 24/8) = 22.003 \times 10^{-3} kg/s$ 와  $(22 + 1.04 \times 10^{-3} \times 24/8) = 25.1 kg/s$ 으로 계산된다. 따라서, 저투과성 및 고투과성 콘크리트 라이닝 각각의 경우에서 1일 누출량 비율은 각각  $(22.033 - 22)/22.033 \times 100 = 0.01\%$ 와  $(25.1 - 22)/25.1 \times 100 = 12\%$ 로 계산된다.

Figure 6은 콘크리트 라이닝 및 주변 암반 투과계수의 변화에 따른 저장공동으로부터의 압축공기 누출량 계산 결과를 나타낸다. 누출량은 저장공동 내부에 1일 저장되는 공기질량에 대한 누출질량의 백분율로 표시하였다. 콘크리트 라이닝의 투과계수가  $1.0 \times 10^{-18} m^2$  이하일 경우, 주변 암반의 투과계수가 고투과성( $1.0 \times 10^{-15} m^2$ )인 경우에도 누출율이 1% 이하로 유지되는 결과를 확인할 수 있다.

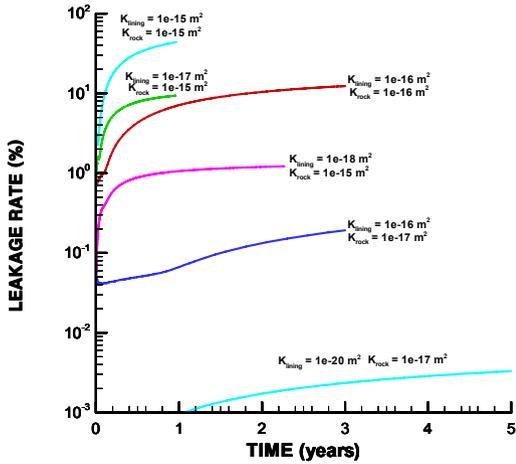


Fig. 6. Calculated evolution of daily leakage percentage for different combinations of concrete lining and rock permeability.

#### 4.2 콘크리트 라이닝 두께가 저장공동의 기밀성능에 미치는 영향

Figure 7은 콘크리트 라이닝의 두께를 50 cm에서 110 cm로 증가시켰을 경우의 누출량 계산결과를 비교

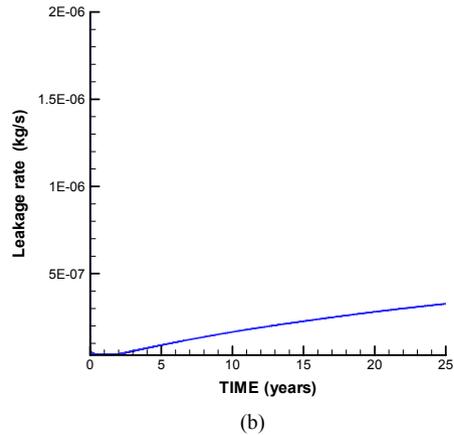
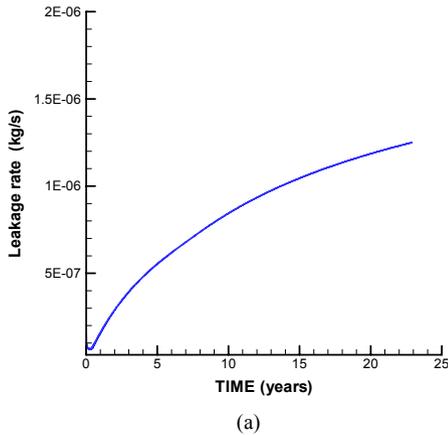


Fig. 7. Calculated evolution of leakage rate when the gas pressure within the cavern is kept constant at 6.25 MPa. (the thickness of concrete lining is (a) 50 cm, (b) 110 cm)

한 것이다. 콘크리트 라이닝 두께를 증가시킴에 따라 누출량은  $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 에서  $2.3 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$ 으로 감소하여 약 25%의 기밀성능 향상 효과를 가져왔다. 그러나, 콘크리트 라이닝의 두께 증가에 따른 기밀성능 향상 효과는 콘크리트 라이닝의 투과계수가 암반의 투과계수보다 상대적으로 낮은 경우에만 관측되었으며 암반의 투과계수가 상대적으로 큰 경우에는(예를 들어, 고투과성의  $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 의 경우), 콘크리트 라이닝 두께에 의한 누출량 변화는 크지 않았다. 따라서, 콘크리트 라이닝 두께보다는 투과특성의 개선을 통한 저장공동의 기밀성능 향상방안을 강구하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 4.3 콘크리트 라이닝의 초기 포화도가 저장공동의 기밀성능에 미치는 영향

Table 3에서는 콘크리트 라이닝의 초기 수분포화도 차이에 따른 누출량 계산결과를 비교하였다. 고투과성의 콘크리트 라이닝( $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ )을 대상으로 콘크리트 라이닝의 초기포화도가 26%(가스포화도: 74%)와 71%(가스포화도: 29%)일 때의 누출량은 각각  $89.9 \text{ kg/day}$  및  $5.51 \text{ kg/day}$ 로 1일 저장질량의 12%와 0.8%로 계산되었다. 따라서, 콘크리트 라이닝의 수분함유량을 증가

Table 3. Leakage rate for different initial saturations of concrete lining and rock.

	Initial gas saturation (-)		Leakage rate (kg/day)	Daily leakage percent (%)
	Concrete lining	Rock		
Analysis conditions	0.74	0.69	89.9	12
	0.29	0.2	5.51	0.8

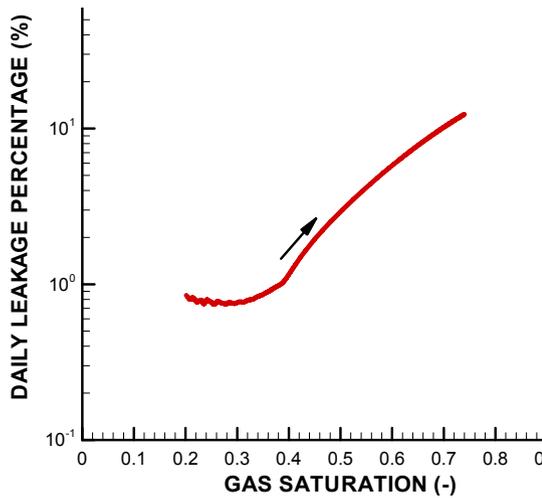


Fig. 8. Calculated daily leakage percentage as a function of gas saturation in the concrete linings.

시커 가스포화도가 감소할수록 저장공동 기밀성능이 향상됨을 알 수 있다. Figure 8은 콘크리트 라이닝의 가스 포화도의 증가에 따른 1일 누출량 계산결과를 나타낸 것으로 가스포화도 증가에 비례하여( 콘크리트 수분함유량이 감소할수록) 저장공동으로부터의 공기누출비율이 증가함을 확인할 수 있다.

**4.4 콘크리트 라이닝의 불포화유동특성이 저장공동의 기밀성능에 미치는 영향**

기본해석에서는 콘크리트 라이닝과 주변 암반의 모세관압 및 상대투과특성을 van Genuchten(1980) 함수를 이용하여 동일하게 설정하였다. van Genuchten 함수의 정의과정에 필요한  $P_0$  상수는 가스침투압(air entry pressure)을 나타내는 것으로 작용 공기압이 가스침투압보다 커질 때 콘크리트 라이닝 공극을 통해 급격한 공기유동이 발생하게 된다. 따라서, 저장공동 운영압력범위와 콘크리트 라이닝 재료특성인  $P_0$ 의 상대적 차이에 따라 누출양상이 변화할 것으로 예상된다.

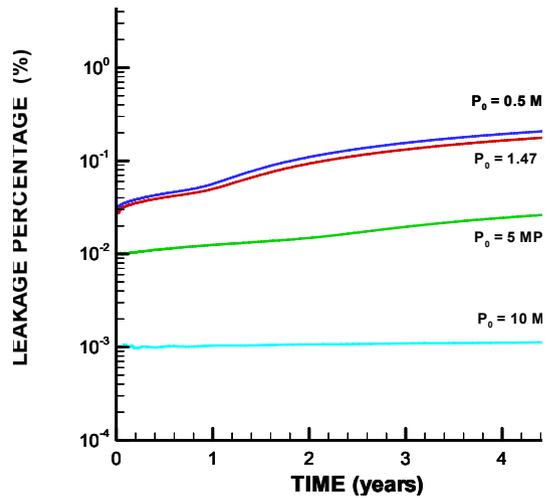


Fig. 9. Calculated evolution of daily leakage percentage for different values of van-Genuchten's parameter  $P_0$  in the capillary pressure curve for concrete linings.

Figure 9는  $P_0$  값을 0.5에서 34.6 MPa까지 변화시켰을 경우의 공기누출량 계산결과를 나타낸다.  $P_0$  값이 저장공동 운영압력(팽창시 최저 5 MPa에서 압축시 최고 10 MPa)보다 작을 경우, 콘크리트 라이닝 투과계수에 비례하여 점진적으로 증가하지만 운영압력보다 높은 가스 침투압 특성을 가질 경우, 모세관포집(capillary trapping)에 의해 압축공기의 누출이 억제되고 누출량은 0.001% 이하로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. Navarro et al. (2006)가 실내실험을 통해 보고한 최대 34.6 MPa의  $P_0$  경우, 저장공동으로부터의 누출은 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

**4.5 저장공동 심도가 기밀성능에 미치는 영향**

Table 4는 저장공동 심도를 100 m에서 500 m로 증가시켰을 경우의 누출량 계산결과를 나타낸다. 콘크리트 라이닝의 투과특성과는 무관하게 고투과성인 경우와 저투과성 두 경우 모두에서 저장심도 증가에 따라

Table 4. Calculated leakage rate for two different cavern depths.

Cavern depth		100 m depth		500 m depth	
Permeability conditions		Tight	Leaky	Tight	Leaky
Gas saturation (-)	Concrete lining	0.6	0.74	0.2	0.25
	Rock	0.9	0.69	0.05	0.2
Leakage rate (kg/day)		$8.6 \times 10^{-2}$	89.9	$1.3 \times 10^{-3}$	$8.6 \times 10^{-1}$
Daily leakage percentage (%)		0.01	12	0.0002	0.1

누출율이 약 100배 정도 감소하여 기밀성능이 향상됨을 확인하였다. 이는 저장공동 심도 증가에 비례하여 주변 지하수압이 증가하고 콘크리트 라이닝 내부 모세관압(저장압축공기압력과 주변 지하수압의 차이)이 감소함으로써 수분함유량이 증가하여 공기의 상대투과특성이 감소하기 때문으로 판단된다.

## 5. 결론

원자력 발전의 기저부하 이용 효율 증대, 기후변화 대응책으로서의 신재생에너지 활용 독려, Smart Grid 등의 전력공급 시스템 선진화 등을 배경으로 국내에서도 압축공기에너지저장(Compressed Air Energy Storage, CAES)에 대한 관심이 증가하고 있다.

본 연구에서는 압축공기에너지 지하저장을 위한 복공식 암반공동의 기밀성능을 평가할 목적으로 TOUGH2 코드를 이용한 다상 다성분 유체 열유동해석을 수행하고, 저장공동 내부로부터 누출되는 공기량을 계산하여 주요 설계인자가 공기누출량에 미치는 영향을 파악하였다. 저장공동 내부 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 투과계수가 공기누출량 및 저장공동의 장기적 기밀성능에 미치는 영향이 큰 것으로 파악되었다. 예를 들어, 심도 100 m에 저장공동 운영압력이 5 MPa에서 8 MPa 사이일 경우, 콘크리트 투과계수를  $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  이하로 시공함으로써 누기량을 1일 저장 공기질량의 1% 이하로 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 콘크리트 라이닝 수분포화도를 증가시킬수록 누기량은 감소하고 저장공동 기밀성능이 향상됨을 확인하였다.

본 논문에는 질량수지분석 결과만을 소개하였으나, 공기 압축과정에서는 고온의 열이 발생하기 때문에 저장공동 내 압축공기 온도와 콘크리트 라이닝 및 주변 암반과의 온도차이에 의한 열전달을 통한 에너지손실이 발생할 수 있다. 압축공기 지하저장공동의 열역학적 에너지수지분석을 통한 저장효율 평가가 향후 추가적으로 수행될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 연구에서의 기밀성능 평가는 저장공동 내 체적이 일정한 것으로 가정하였으나, 압축공기 저장 및 배출의 반복에 따른 저장공동의 역학적 변형과 이에 따른 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 투과특성 변화 등을 함께 고려함으로써 기밀성능 평가의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 복공

식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김택곤, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 한국암반공학회 춘계학술대회논문집, pp. 123-131.
2. 김형목, 류동우, 정소걸, 송원경, 2009, 일본의 압축공기 지하저장 기술, 2009년 한국암반공학회 춘계학술발표회논문집, pp. 9-19.
3. 김형목, 류동우, 신중호, 송원경, 2010, 모형실험을 통한 콘크리트 블록 및 시공이음부의 기밀성 측정, 터널과 지하공간.
4. 박완문, 이경복, 정훈영, 송원경, 류동우, 김형목, 최종근, 2010, 압축공기저장시설의 국내적용을 위한 지하공동의 기밀성 분석, 한국지구시스템공학회지, 47(1), pp. 17-25.
5. 이연규, 박경순, 송원경, 박철환, 최병희, 2009, 압축공기 저장용 터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 19(6), pp. 498-506.
6. Battistelli, A., Calore, C., Pruess, K., 1997, The simulator TOUGH2/EWASG for modelling geothermal reservoirs with brines and non-condensable gas, Geothermics, Vol. 26(4), pp. 437-464.
7. Itasca, FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 4.0. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, pp. 438. 2009.
8. Jessica, L. N., 2006, Reservoir Simulation of Combined Wind Energy and Compressed Air Energy Storage in Different Geologic Settings, MS Thesis, Colorado School of Mines, USA.
9. Navarro, V., Yustres, A., Cea, L. Candel, M. Juncosa, R. and Delgado, J., 2006, Characterization of the water flow through concrete based on parameter estimation from infiltration tests, Cement and Concrete Research 36, pp. 1575-82.
10. Pepper, D., Utility Power Storage Technologies, BCC Research, 2008.
11. Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., TOUGH2 User's Guide Version 2.0, LBNL-43134, 1999.
12. Pruess, K. Spycher, N., 2006, ECO2N-A new TOUGH2 fluid property module for studies of CO2 storage in saline aquifers, Proceedings of TOUGH Symposium, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 15-17, 2006, pp. 1-7.
13. Van Genuchten, M. T., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci Soc Am J 44 (1980), pp. 892-898.
14. Wu, Y. S., Pan, L., Zhang, W. and Bodvarsson, G. S., 2002, Characterization of Flow and Transport Processes within the Unsaturated Zone of Yucca Mountain, Nevada." Journal of Contaminant Hydrology 54, pp. 215-247.



### 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



### Jonny Rutqvist

1988년 Msc., Geotechnlogy, Lulea University of Technology, Sweden  
1990년 Technical Licentiate, Rock Mechanics, Lulea University of Technology, Sweden  
1995년 Ph.D., Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Sweden

Tel: +1-510-486-5432  
E-mail: jrutqvist@lbl.gov  
현재 Staff Scientist, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA



### 선우준

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