

열-수리-역학적 연계해석을 이용한 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 역학적 안정성 평가

김형목^{1)*}, Jonny Rutqvist²⁾, 류동우¹⁾, 신중호³⁾, 송원경³⁾

Geomechanical Stability of Underground Lined Rock Caverns (LRC) for Compressed Air Energy Storage (CAES) using Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical Analysis

Hyung-Mok Kim, Jonny Rutqvist, Dong-Woo Ryu, Joong-Ho Synn, Won-Kyong Song

Abstract In this paper, we applied coupled non-isothermal, multiphase fluid flow and geomechanical numerical modeling using TOUGH-FLAC coupled analysis to study the complex thermodynamic and geomechanical performance of underground lined rock caverns (LRC) for compressed air energy storage (CAES). Mechanical stress in concrete linings as well as pressure and temperature within a storage cavern were examined during initial and long-term operation of the storage cavern for CAES. Our geomechanical analysis showed that effective stresses could decrease due to air penetration pressure, and tangential tensile stress could develop in the linings as a result of the air pressure exerted on the inner surface of the lining, which would result in tensile fracturing. According to the simulation in which the tensile tangential stresses resulted in radial cracks, increment of linings' permeability and air leakage through the linings, tensile fracturing occurred at the top and at the side wall of the cavern, and the permeability could increase to $5.0 \times 10^{-13} m^2$ from initially prescribed $1.0 \times 10^{-20} m^2$. However, this air leakage was minor (about 0.02% of the daily air injection rate) and did not significantly impact the overall storage pressure that was kept constant thanks to sufficiently air tight surrounding rocks, which supports the validity of the concrete-lined underground caverns for CAES.

Key words TOUGH-FLAC coupled analysis, Lined rock cavern (LRC), Geomechanical stability, Tensile fracturing, Compressed air energy storage (CAES)

초 록 본 연구에서는 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 역학적 변형 및 누출 거동의 복합거동을 파악할 목적으로 비등온 다상다성분 유체유동 및 역학적 거동의 연계해석이 가능한 TOUGH-FLAC 해석을 실시하였다. 지하 압축공기에너지 저장 공동의 초기 및 장기 운영 과정에서 고압 압축공기 인입·입출에 따른 콘크리트 라이닝 내부에 발생하는 응력 양상을 살펴보고 저장공동 내부 압력 및 온도 변화를 파악함으로써 기밀성능을 평가하였다. 최대 저장공동 운영압력 8 MPa 조건에서 콘크리트 라이닝 내부에서는 공기침투압에 의한 유효응력의 감소와 접선방향의 인장응력의 증가에 따라 인장균열이 발생할 수 있음을 확인하였다. 콘크리트 라이닝 내부의 인장균열 발생에 따른 투과특성 증가 모델을 이용한 해석 결과, 저장공동 천정부 및 측벽부 일부에서 인장파괴가 발생하여 이들 영역에서의 투과계수는 초기 $1.0 \times 10^{-20} m^2$ 에서 $5.0 \times 10^{-13} m^2$ 까지 증가하였다. 한편, 콘크리트 라이닝 내부 인장균열 발생 및 투과특성 증가에도 불구하고 저장공동 내부 압축공기 압력은 주변 암반의 기밀성능으로 인해 일정하게 유지되고 공기누출량은 일일주입량의 0.02%에도 못 미쳐 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 유효성을 확인할 수 있었다.

핵심어 TOUGH-FLAC, 연계해석, 지하 복공식 암반공동, 역학적 안정성, 인장균열, 압축공기에너지저장

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

²⁾ Staff Scientist, Lawrence Berkeley National Laboratory

³⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : kimh@kigam.re.kr

접수일 : 2011년 10월 10일

심사 완료일 : 2011년 10월 20일

게재 확정일 : 2011년 10월 27일

1. 서 론

에너지 저장과 관련한 지하공간은 주로 탄화수소(hydrocarbon)의 대용량 비축을 중심으로 활용되어 왔다. 기후변화로 촉발된 최근의 온실가스 감축 노력은 신재생 에너지 보급과 국가에너지 효율성 제고 측면에서 대용

량 전력에너지 저장장치로서의 지하공간으로 재평가 받기에 이르렀다. 이에 대용량의 에너지를 압축공기에너지로 변환하여 지하 암반공동에 저장하는 압축공기에너지 저장발전 시스템(CAES: Compressed Air Energy Storage)에 대한 관심이 증가하고 있다(김택곤 외, 2008; Pepper, 2008).

복공식 지하 압축공기에너지 저장방식은 암염공동 및 기존 광산갱도를 이용한 저장방식에 비해 높은 비용이 소요될 수 있지만, 부지 선정의 유연성 및 발전단지/ 전력수요처와의 연계성 측면에서 장점을 가진다. 또한, 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동은 콘크리트 라이닝으로 대표되는 복공시스템을 이용하여 천심도에서도 기밀성 및 역학적 안정성의 확보가 가능하여 추가적인 비용 절감효과를 기대할 수 있다. 이 경우 양수발전을 대체하는 대용량 전력에너지저장시설로서의 역할 뿐만 아니라 전력수요가 집중되는 도심지 근처의 전력수급을 원활하게 하는 기능을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

지하 압축공기에너지 저장시설에서 요구되는 두 가지 주요 성능으로는 기밀성과 역학적 안정성을 들 수 있다. 이러한 요구 성능은 저장공동 형상 및 크기, 설치심도, 운영압력, 지하수위, 암반강도 및 투과특성 등과 같은 설계변수에 의해 결정된다. 김형목 등(2011a)은 복공식 지하압축공기에너지 저장 공동의 기밀성능에 미치는 설계변수의 영향을 공기와 지하수의 다상유동해석을 통해 검토하고 저장공동 운영압력조건이 최소 5 MPa에서 최대 8 MPa 조건에서 콘크리트 라이닝의 투과계수가 $1.0 \times 10^{-18} m^2$ 이하이면 누기량이 1% 미만으로 유지될 수 있음을 보인 바 있다. 또한, 콘크리트 라이닝의 초기 수분 포화도를 증가시켜 저장공동의 기밀성능을 향상시킬 수 있고 콘크리트 라이닝 투과계수로 대표되는 설계변수가 저장공동의 에너지 효율에 미치는 영향을 수치해석적으로 검토하였다(김형목 외, 2011b). 지하 압축공기에너지 저장시설의 역학적 안정성에 관한 연구로는 저장공동 내 공기압력과 콘크리트 라이닝 배면하중의 상대적 크기에 따른 라이닝 내 응력발생 및 파괴양상에 관한 해석적 연구(이연규 외, 2009)와 지하 저장공동을 밀폐시키기 위한 콘크리트 플러그의 형상 및 크기에 따른 역학적 안정성을 수치해석을 통해 분석한 결과(이연규 외, 2010; 박도현 외, 2011)가 보고된 바 있다.

한편, 공기 압축과정에서는 고온의 열이 발생하고 상대적으로 고온의 압축공기를 대기압, 상온 조건의 콘크리트 라이닝 저장 공동 내에 주입·저장함에 따라 콘크리트 라이닝 및 주변 암반사이에는 열전달 및 열응력 발생에 따른 역학적 변형 및 기밀성능의 변화가 발생할

수 있다. 또한, 고압의 압축공기가 저장공동 벽면에 미치는 압력은 복공재인 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 역학적 변형을 가져와 이는 역학적 안정성뿐만 아니라 공기누출 및 지하수 유동과도 연계된 복합적 거동을 보일 것으로 예상된다. 따라서, 지하 압축공기에너지 지하 저장공동 주변 복합거동은 방사성 폐기물 처분, 지열에너지개발, 이산화탄소 지층처분 등의 주요 고려사안 중 하나인 열-수리-역학적으로 연계된 거동에 해당한다.

이에 본 연구에서는 지하 암반의 열-수리-역학적 복합거동 해석에 활발히 적용되어 그 적용성이 검증된 TOUGH-FLAC 연계해석(Rutqvist et al., 2002)을 이용하여 저장공동 내부에 고압의 압축공기 주입/토출 과정을 반복하는 과정에서 콘크리트 라이닝 내부의 응력 발생 양상을 파악함으로써 역학적 안정성에 대한 검토를 실시하고 이들 역학적 특성 변화가 저장공동의 기밀성능에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

2. TOUGH-FLAC 연계해석

TOUGH-FLAC 연계해석은 다상(multi-phase: aqueous, gas, NAPL, oil 등) 다성분(multi-component: water, solutes, air, vapor, CO₂, VOCs, CH₄) 유체 유동 및 열유동 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 TOUGH2 코드(Pruess et al., 1999)와 암반/지반을 대상으로 역학적 안정성 해석을 위한 FLAC3D(ITASCA, 2009)를 순차적으로 연계·반복 해석하는 기술로 Rutqvist et al.(2002)에 의해 제안된 이후 심부지열개발, 방사성폐기물 지층처분, 이산화탄소 지층처분 등에 적용되어 왔다(Rutqvist, 2010). TOUGH-FLAC 연계해석기술은 서로 다른 2개의 해석 코드를 연계함으로써 각각의 기능을 최대한 효율적으로 활용하고 지하 암반의 열-수리-역학적으로 연계된 복합적 거동 및 지하 구조물의 안정성 해석에 적용 가능한 특징이 있다.

2개의 프로그램은 FLAC3D 내의 FISH 함수를 통해 해석결과를 주고받는 연계모듈(coupling module)을 통해 연결된다. TOUGH2 해석을 통해 유체압력(P), 포화도(S) 및 온도(T)를 계산하고 유효응력 및 열응력을 고려한 FLAC3D 계산을 통해 공극률(ϕ), 투수계수(k), 모세관압(P_c)을 수정·반영한 TOUGH2 계산을 반복하게 된다(그림 1). 공극률, 투과계수 및 모세관압은 평균유효응력 혹은 체적변형률의 함수로 수정·업데이트 된다.

TOUGH2 해석과정에서는 각 시간단계(time step) 혹은 동일 시간단계의 비선형 반복계산과정(Newton iteration) 수준에서 FLAC3D를 이용한 준정적(quasi-static) 역학적 안정성 해석을 실시할 수 있다. 시간단계 수준의 연

계해석은 공극률 및 투과계수가 일정한 것으로 간주하기 때문에 이들 변수의 변화가 완전한 조건에서 시간 간격을 충분히 작게 설정해야 한다.

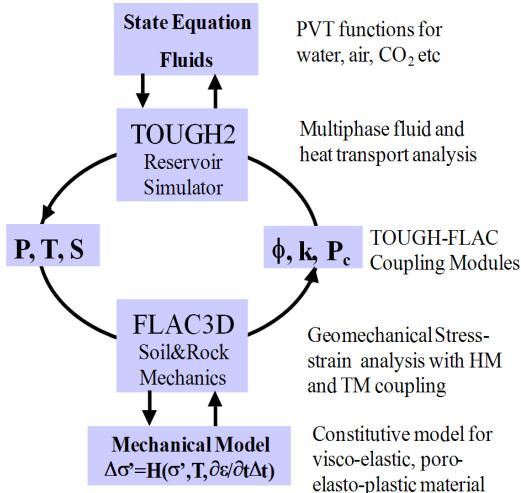


그림 1. TOUGH-FLAC 연계해석의 원리

TOUGH-FLAC 연계해석은 방사성 폐기물 처분, 심부 지열에너지 개발, 이산화탄소 심지층 처분 등의 프로젝트를 통해 열-수리-역학적으로 상호 작용하는 복합적 암반 거동의 해석에의 적용성이 검증되었으며(Rutqvist, 2010), 본 연구에서는 콘크리트 라이닝 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 주변의 복합거동을 시뮬레이션하고 기밀성능뿐만 아니라 역학적 안정성을 분석하였다.

3. 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 해석개요

3.1 해석모델

본 연구에서는 2차원 원형 단면 형상을 가지는 지하 압축공기에너지 저장공동을 대상으로 TOUGH-FLAC 연계해석을 실시하였다(그림 2). 해석모델은 기존의 TOUGH2 해석을 이용한 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 기밀성능 설계변수의 민감도 해석(김형목 외, 2011a) 및 열역학적 에너지 수치 분석(김형목 외, 2011b)과 동일하나 경계조건 설정 및 해석과정이 상이하다. 원형 저장공동의 굴착직경은 6 m, 콘크리트 라이닝 설치 후 내경은 5 m이다. 콘크리트 라이닝의 두께는 50 cm이고

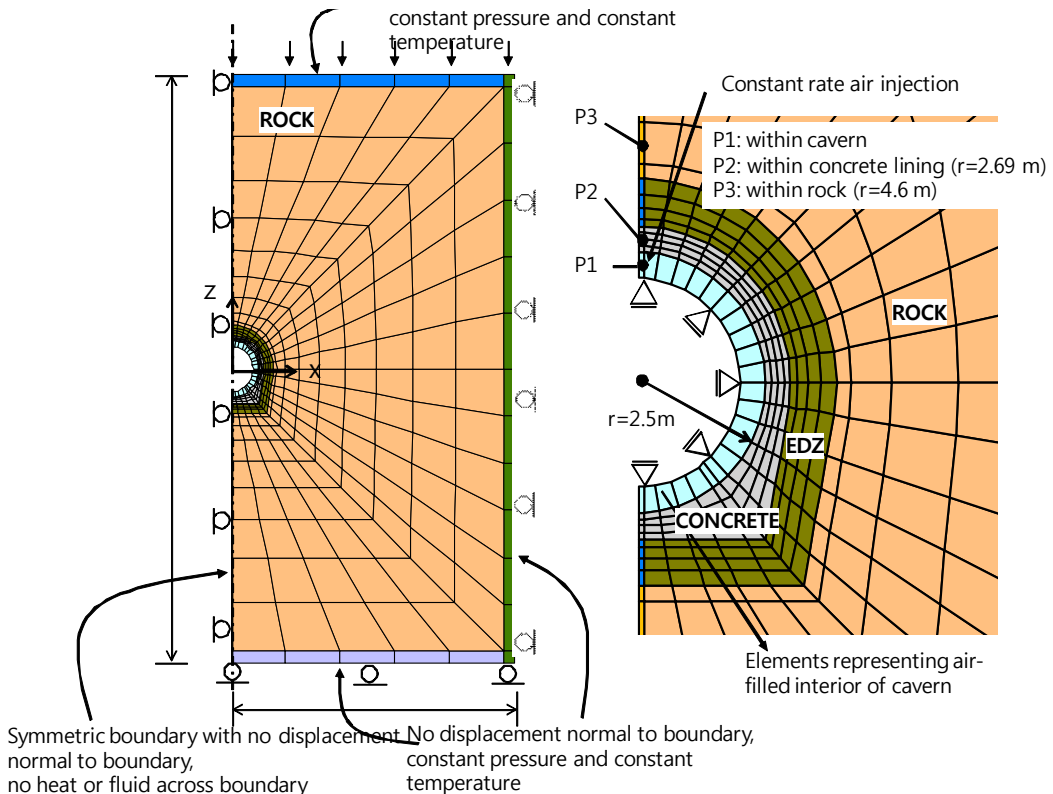


그림 2. 지하압축공기에너지 저장공동 해석을 위한 TOUGH-FLAC 해석모델

라이닝 배면의 암반손상영역(Excavation Disturbed Zone, EDZ)은 고려하지 않았다. 저장공동은 지하 100 m 심도에 위치하고 지하수면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다.

TOUGH-FLAC 연계해석을 위해서 저장공동 내부에는 공동 내 전체 부피에 해당하는 요소부피를 가지는 1열의 특이 요소를 배치하였다. 기존 TOUGH2를 이용한 유사해석과 달리 연계해석에서는 이들 특이 요소의 물성값 설정 및 공동 중심방향으로의 변위를 구속함으로써 저장공동 내부에서의 압력, 온도 변화 및 콘크리트 라이닝 벽면에 작용하는 압력을 재현하였다. 특이 요소의 공극률 및 투과계수는 각각 1.0 및 $1.0 \times 10^{-9} m^2$ 으로 콘크리트 라이닝에 비해 충분히 크기 때문에 압축공기의 주입·배출에 따른 저장공동 내부에서의 압축공기 유동 및 저장 압축공기의 누출에 따른 압력 및 온도 변화를 나타낼 수 있다. 또한, 이들 특이 요소는 역학적으로 매우 유연하고($E=3.5 MPa$, $\nu=0.3$) 공동 중심방향으로의 변위 구속을 통해 저장 압축공기가 콘크리트 라이닝 벽면에 미치는 압력에 의한 저장공동의 역학적 변형을 동시에 고려할 수 있어 역학해석을 위한 별도의 압력하중 경계조건을 설정하는 번거로움을 피할 수 있는 장점이 있다.

해석모델 내부에는 저장공동 (P1), 콘크리트 라이닝 (P2), 주변 암반 (P3)에 관측점을 설치하고 저장공동 운영에 따른 이들 관측점에서의 압력 및 온도 변화를 모니터링하였다. 또한, 저장공동의 역학적 변형 관측을 목적으로 저장공동 상부 (D1)와 측벽부 (D2)에서는 변위 관측점을 설치하였다.

3.2 해석조건

해석에 사용한 제반 재료 물성을 표 1에 요약하였다. TOUGH-FLAC 연계해석의 지하 압축공기에너지저장에의 적용성 검증을 목적으로 한 기초해석에서는 암반손상영역 및 주변 암반의 물성이 동일한 것으로 설정하였으며, 라이닝 콘크리트의 투과계수는 주변 암반에 비해 충분히 낮은 것으로 가정하였다. 저장공동 라이닝 콘크리트 및 주변 암반의 불포화 특성은 van Genuchten 모델(van Genuchten, 1980) 및 Corey's 상대투과계수 모델(Corey, 1954)을 이용하여 나타내었고, 이들 모델 정의에 필요한 상수들은 기존문헌(Finsterle and Pruess, 1995; Alonso et al, 2005)의 값을 이용하였다.

저장공동 운영압력은 압축·저장 시 최대 8 MPa, 팽창·배출시 최소 5 MPa의 압력범위로 설정하였다. 저장공동 운영조건은 하루 8시간 압축·저장하고 4시간 유지한 후, 4시간 팽창·배출하고 이후 8시간 유지하는 것으로 가정하였다. 저장공동 내 압축공기 주입량(2차원 해석이므로 축방향 단위길이 당 주입량)은 $2.2 \times 10^{-2} kg/s$, 배출량은 배출시간이 주입시간의 1/2이므로 주입량의 2배에 해당하는 $4.4 \times 10^{-2} kg/s$ 으로 설정하였다. 주입 압축공기 온도는 21.5°C로 일정하게 유지하였다.

그림 2에서 보는 바와 같이 저장공동 경계를 제외한 해석모델 외곽 경계는 일정 온도 및 압력 조건으로 설정하였다. 초기 조건으로 지표면 온도는 10°C, 온도구배는 3°C/100 m, 지하수면은 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. 따라서, 저장공동 설치심도 주변 암반의 초기 온도 및 지하수압은 13°C 및 1 MPa이다.

해석순서는 다음과 같은 단계로 실시하였다.

표 1. TOUGH-FLAC 연계해석에 이용한 제반 물성

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

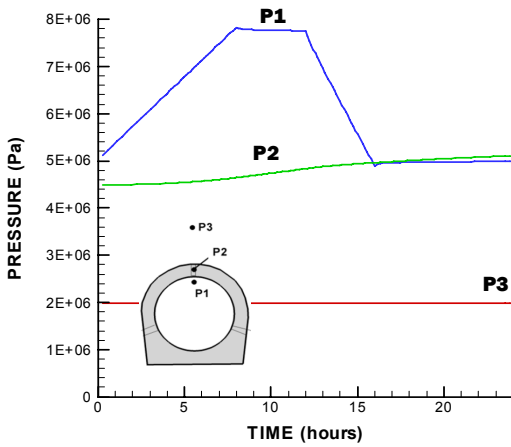
- Step 1: 저장공동 굴착 전 온도, 압력, 응력의 초기평형 상태 해석
- Step 2: 굴착 후 1주일 동안 저장공동은 무지보상태/대기압 조건에서 온도, 압력, 응력 분포 재계산
- Step 3: 콘크리트 라이닝(초기 물포화도 70%)을 설치하고 저장공동 내부에는 대기압이 작용하는 조건에서 온도, 압력 분포 계산
- Step 4: Step 3를 초기조건으로 상기 저장공동 운영조건에 해당하는 해석조건 설정

3.3 기초해석결과

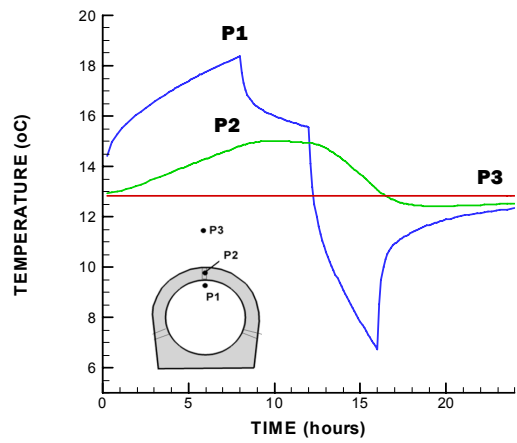
그림 3은 압축공기 주입 및 배출에 따른 저장공동 내

부 (P1), 콘크리트 라이닝 (P2), 주변 암반 (P3)에서의 유체압력 및 온도변화를 나타낸 것이다. 이는 역학적 변형을 고려하지 않은 TOUGH2 만을 이용한 기존 해석결과와 동일하다. 저장공동 운영압력 거동(압축·주입 시 최대 8 MPa 에서 팽창·배출시 최소 5 MPa)을 잘 재현하고 있으며 콘크리트 및 주변 암반에서의 유체압력변화는 아주 작음을 알 수 있다. 또한, 압축공기 압축·주입 과정에서 상승한 온도는 팽창·배출 과정에서 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 4는 지하 압축공기에너지 저장공동 내부 벽면에서의 변위 발생량 계산결과를 나타낸다. 압축공기 주입 및 배출에 따른 저장공동 반경의 팽창 및 수축량은 최대 0.3



(a) 압력



(b) 온도

그림 3. 압축공기 주입 및 배출에 따른 (a) 압력 및 (b) 온도 변화 계산결과

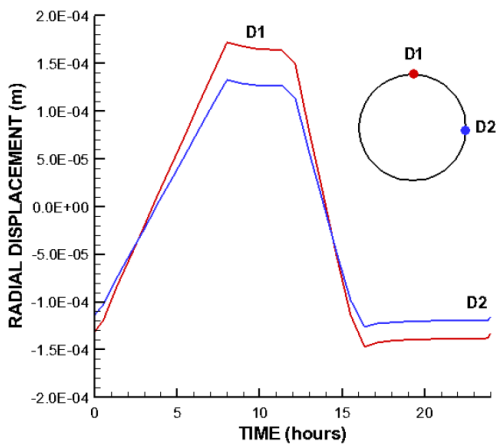


그림 4. 지하압축공기에너지 저장공동 벽면에서의 변위 계산결과

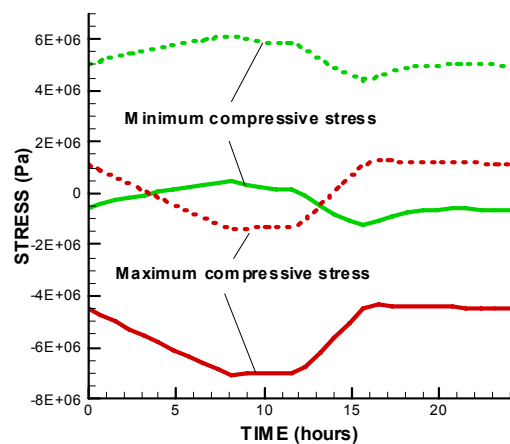


그림 5. 지하압축공기에너지 저장공동 콘크리트 라이닝 내부 (P2)에서의 응력 발생 양상(점선: 유효응력, 실선: 전응력)

mm 이하로 이를 부피변화로 환산할 경우 $2.5 \times 10^{-3} m^3$ 에 해당한다. 이는 저장공동 전체부피 $19.63 m^3$ 의 약 0.0012%에 해당하는 것으로 압축공기 주입/배출 과정에서의 저장공동 부피변화는 아주 작음을 알 수 있다. 따라서, 압축공기의 주입 및 배출과정에서 저장공동 내 총 부피가 일정하다는 기존 질량 및 에너지수지분석(김형목 외, 2011)에서의 가정은 타당함을 확인하였다.

그림 5는 저장공동 콘크리트 라이닝 내부 (P2)에서의 응력계산결과를 나타낸다. 그림에서 양(+)의 영역은 인장응력을 나타내고, 압축공기 저장압력에 따른 공기침투압을 고려한 콘크리트 라이닝 내부 최소유효주응력은 최대 6 MPa 정도까지 발생하는 결과를 보였다.

4. 해석결과

4.1 지하 압축공기에너지 저장공동의 초기운영과정 해석결과

그림 6은 지하 압축공기에너지 저장공동 굴착 후 운영초기과정에서의 압력, 온도, 가스포화도, 콘크리트 라이닝 내부 응력 계산 결과를 나타낸다. 그림 6(a)에서 대기압 조건에서 압축공기 주입 개시 약 24시간 경과 후 운영최대압력에 도달하였으며 이후 주입·배출 과정의 반복에 따른 압력거동을 나타내고 있다. 콘크리트 라이닝 내 유체압력 (P2)은 점진적으로 증가하는 양상을 보였으며 암반 내 유체압력 (P3)은 일정하게 유지되어 암반에의 압축공기 누출은 없는 것으로 보인다. 압축공기 주입 초기에는 저장공동 내부 및 콘크리트 라이

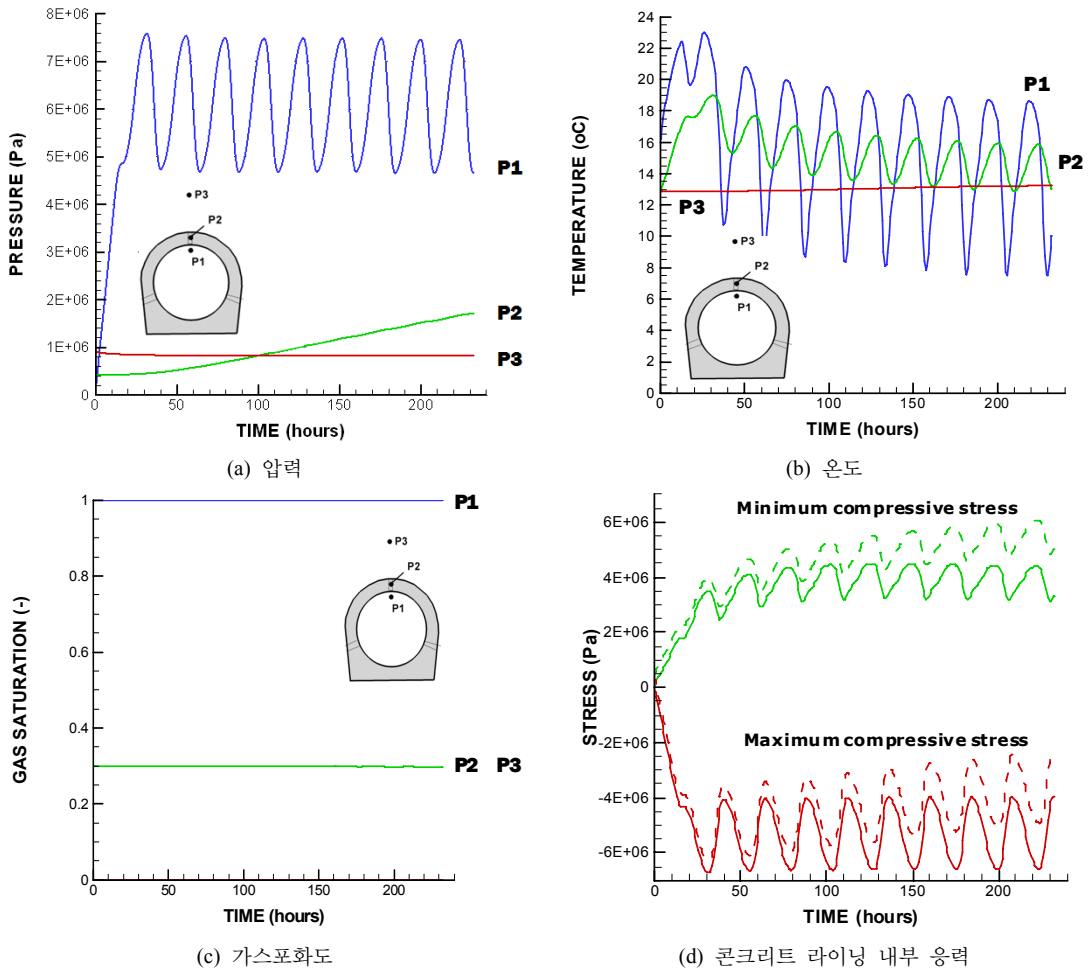


그림 6. 지하 압축공기에너지 저장공동의 초기운영과정에서의 (a) 압력, (b) 온도, (c) 가스포화도 및 (d) 콘크리트 라이닝 내 응력(점선: 유효응력, 실선: 전응력) 계산 결과

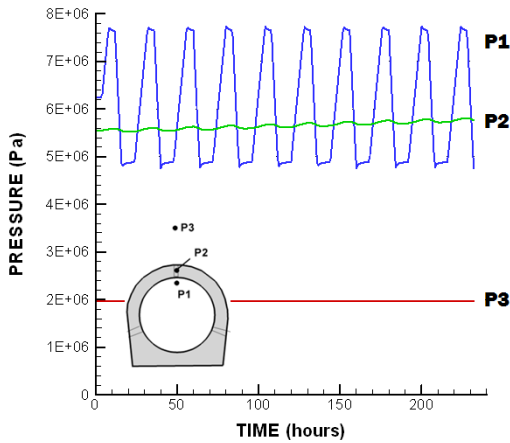
닝의 온도가 상승하였으나 이후 일정한 범위에서 안정된 거동을 보였다(그림 6(b)). 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 가스포화도는 저장공동 운영초기과정에서부터 압축공기 주입·배출 반복과 무관하게 초기 가스포화도인 30%로 일정한 값을 보였다(그림 6(c)).

그림 6(d)는 지하 압축공기에너지 저장공동 운영과정에서 콘크리트 라이닝 내부의 응력변화과정을 나타낸다. 그림에서 점선은 유효응력을 실선은 전응력을 나타낸다. 양 (+)의 값은 인장, 음 (-)의 값은 압축응력을 나타낸다. 저장공동 운영과정에서 발생하는 콘크리트 라이닝 내부의 최대주응력은 -7 MPa에 이르고, 최소주응력은 6 MPa로 계산되었다. 라이닝 벽면에 작용하는 압축공기로 인해 최대주응력은 공동반경방향으로 작용하

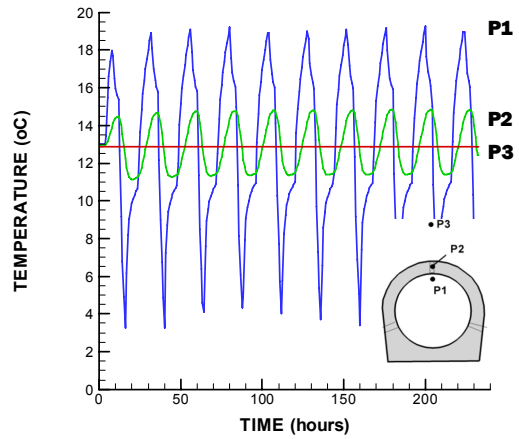
며, 최소주응력은 접선방향으로 작용하게 된다. 또한, 압축공기 저장공동 운영 초기에는 콘크리트 내부로의 침투공기압의 영향이 상대적으로 작아 유효응력과 전응력이 유사한 값을 보이거나 운영시간이 증가함에 따라 그 차이가 증가하는 결과를 볼 수 있다.

4.2 지하 압축공기에너지 저장공동의 장기운영과정 해석결과

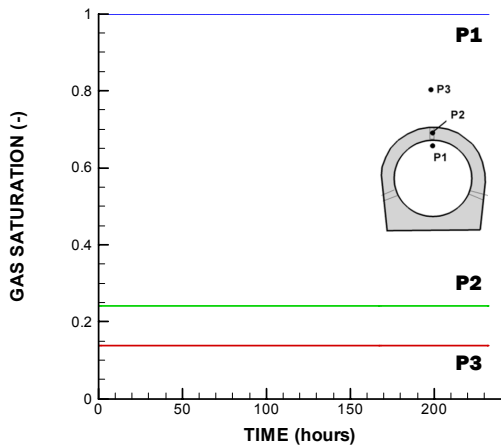
지하 압축공기에너지 저장공동의 장기운영과정에서의 압력, 온도 및 응력발생 양상을 파악할 목적으로 저장공동 운영개시 15년 경과 후를 초기조건으로 하여 10회의 압축공기 주입·배출 과정을 반복하였다. 15년간의 저장공동 운영과정은 저장공동 압력범위(주입 시 최대



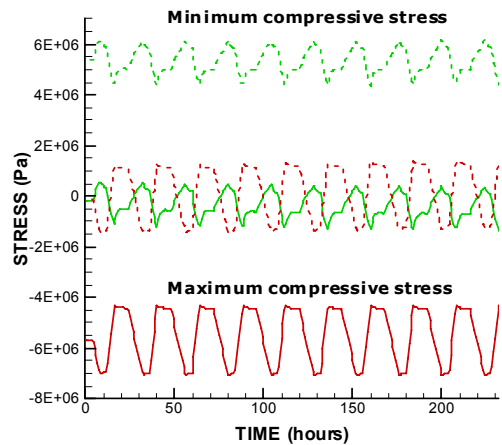
(a) 압력



(b) 온도



(c) 가스포화도



(d) 콘크리트 라이닝 내부 응력

그림 7. 지하 압축공기에너지 저장공동의 장기운영과정에서의 (a) 압력, (b) 온도, (c) 가스포화도 (d) 콘크리트 라이닝 내 응력(점선: 유효응력, 실선: 전응력) 계산결과

8 MPa, 배출시 최소 5 MP)의 평균값에 해당하는 6.25 MPa를 일정하게 유지하는 것으로 재현하였다.

그림 7은 압력, 온도, 가스포화율 및 콘크리트 라이닝 내부 응력 계산결과를 나타낸다. 콘크리트 라이닝의 투과계수가 충분히 낮아 기밀성이 확보될 경우, 저장공동의 장기적 운영에 따른 저장공동 내 압력 손실은 없는 것으로 나타났으며(그림 7(a))콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 온도 변화는 안정된 거동을 보였으며(그림 7(b)) 가스포화도 역시 일정한 것으로 나타났다(그림 7(c)).

그림 7(d)은 장기운영과정에서의 콘크리트 라이닝 내 응력변화 양상을 나타낸다. 초기운영과정에서의 응력분포(그림 6(d))와는 다르게 콘크리트 라이닝 내 침투가스 압의 증가로 유효응력과 전응력의 차이가 상당히 크게 나타났다. 한편, 최대주응력과 최소주응력의 차이는 감소하여 전응력은 모두 압축력에 해당하는 결과를 보였다. 최소유효주응력은 4 MPa에서 6 MPa의 범위에 분포하였으며, 이는 콘크리트 라이닝의 인장강도가 6 MPa 이하일 경우 인장균열이 발생하고 이를 통해 저장 압축공기가 누출될 수 있음을 의미한다.

4.3 초기응력분포의 영향

지하 압축공기에너지 저장공동 주변 암반의 초기응력 분포가 역학적 안정성에 미치는 영향을 검토할 목적으로 수평응력 대 수직응력 비 (K)가 2.0인 이방성 초기 응력조건($K=2.0, \sigma_x = \sigma_y = 2 \times \sigma_z$)에서의 콘크리트 라이닝 및 주변 암반에서의 응력발생 양상을 조사해 보았다. 콘크리트 라이닝 내 응력분포는 등방성(K=1.0)일

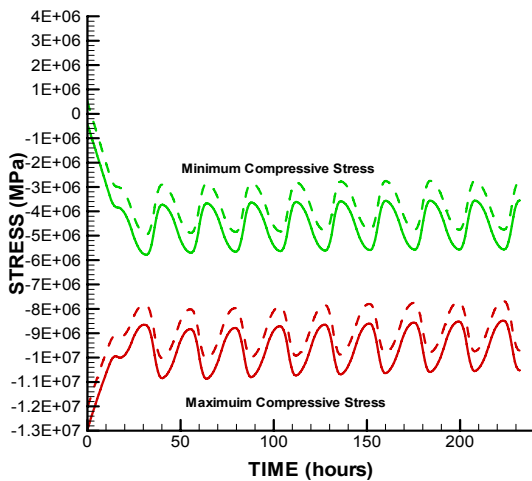
경우(그림 6(d))와 유사한 결과를 보여, 암반 초기응력 분포의 영향을 받지 않는 것으로 파악되었다.

한편, 그림 8은 콘크리트 라이닝 배면에 접하는 암반에서의 응력발생양상을 나타내는 것으로 저장공동 천정부 및 측벽부에서의 응력값을 나타낸다. 저장공동 천정부 암반에서는 수평응력의 영향으로 접선방향으로의 최대주응력값이 증가하는 것으로 나타났으며 반경방향의 최소주응력은 0에 근사하였다. 압축공기 주입에 따라 최대주응력값은 급격하게 감소하고 최소주응력도 압축력으로 작용함을 알 수 있다.

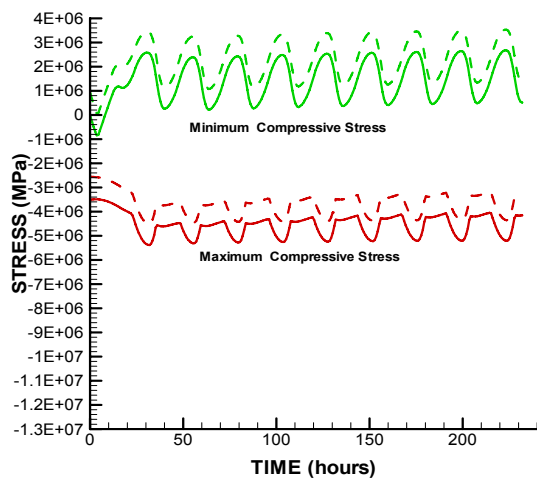
저장공동 측벽부에서는 최소주응력값은 초기 0에 가까운 압축공기 주입에 따라 인장력으로 작용하여 최대 3 MPa에 이르는 것으로 나타났다. 이는 주변 암반의 인장균열을 발생하기에는 충분하지 않지만 기존 균열을 확장하기에는 충분히 큰 인장력이라 할 수 있다.

4.4 역학적 변형에 따른 투과특성 변화의 영향

압축공기 저장에 따른 콘크리트 라이닝 내 접선방향 최소주응력이 콘크리트 인장강도를 초과하는 경우, 인장균열이 발생하고 이는 콘크리트 라이닝 투과특성의 증가로 이어진다. 콘크리트의 라이닝의 인장 균열 발생과 같은 역학적 변형에 의한 투과특성의 변화는 Hosseini et al.(2009)의 연구결과에 기초하였다. Hosseini et al.(2009)은 실내실험을 통해 압축응력 변화에 따른 콘크리트 투과계수의 변화를 조사하고, 콘크리트 투기계수는 파괴 응력의 50% 수준까지는 약 10% 감소하는 결과를 보였으며, 이후 미세균열의 생성 등으로 인해 증가하기 시작하



(a) 천정부



(b) 측벽부

그림 8. 이방성 초기응력 조건에서의 지하 압축공기에너지 저장공동 (a) 천정부 및 (b) 측벽부에서의 응력 발생 양상(점선: 유효응력, 실선: 전응력)

여 80% 응력수준에서 급격하게 증가하는 결과를 보고한 바 있다. 또한, 균열개구변위(crack opening displacement, COD)가 100~200 μm 를 초과한 이후 투과특성이 급격하게 증가하는 결과를 보고한 바 있다. 그림 9는 콘크리트 라이닝의 투과계수 변화를 변형률 및 균열개구변위의 함수로 표시한 것으로 COD가 100 μm 까지는 투과계수의 변화가 없으나 이후 급격하게 증가하는 거동을 보인다.

COD는 접선변형률의 함수로 식 (1)과 같이 표시하였으며, 인장파괴조건을 만족하면 개별해석요소와 교차하는 단일균열간극이 증가하는 것으로 설정하였다.

$$b_m = B \times \epsilon_\theta \quad (1)$$

여기서, b_m 은 균열 간극(aperture), B 는 접선방향 개별해석요소 폭, ϵ_θ 는 접선변형률이다.

콘크리트 라이닝 인장균열의 투과계수 (k_f)는 삼승법칙(cubic law)를 이용하여 식 (2)와 같이 표시하였다.

$$k_f = \frac{(f \times b_m)^3}{12B} \quad (2)$$

여기서, f 는 역학적(혹은 물리적) 균열 간극과 수리학적 균열 간극의 차이를 설명하기 위한 상수이다.

따라서, 콘크리트 라이닝의 투과계수 (k)는 초기투과계수 (k_0)와 인장균열의 확장에 의한 투과계수 (k_f)의 합으로 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$k = k_0 + k_f = k_0 + A(\epsilon_\theta - \epsilon'_\theta)^3 \quad (3)$$

여기서, $A = B^2 f^3 / 12$ 이고, ϵ'_θ 는 그림 9에서 투과특성이 급격히 증가하기 시작하는 임계접선변형률(threshold tangential strain)을 나타낸다. 본 해석에서는 $B = 10\text{cm}$, $f = 0.5$, $A = 1 \times 10^{-4}$, $\epsilon'_\theta = 1 \times 10^{-3}$ 을 설정하였다.

그림 10은 콘크리트 라이닝의 역학적 변형에 의한 투과특성의 변화를 고려한 지하 압축공기에너지 저장공동 내부 (P1), 콘크리트 라이닝 (P2), 주변 암반 (P3)에서의 (a) 압력, (b) 온도, (c) 가스포화도 및 (d) 공기누출량을 계산한 결과이다. 이 때, 콘크리트 라이닝의 인장강도로는 3 MPa을 설정하였다. 그림 10(a)에서 압축 공기 주입개시 약 24시간 경과 후 콘크리트 라이닝에의 인장균열 발생과 이에 따른 투과특성 증가로 인해 저장공동 내부와 콘크리트 라이닝의 압력이 동일한 거동을 보이기 시작함을 알 수 있다. 또한, 누출 압축공기로 인해 주변 암반의 유체압력도 저장공동 운영시간에 비례하여 점차 증가하는 양상을 볼 수 있다. 콘크리트 라이닝의 투과특성 변화가 온도변화에 미치는 영향은 크지 않았으나(그림 10(b)), 주변 암반의 가스포화도는 압력과 마찬가지로 운영시간에 비례하여 점차 증가하는 거동을 보였다(그림 10(c)). 그림 10(d)에서 콘크리트 라이닝을 통한 공기누출량은 인장균열 발생과 동시에 일시적으로 증가하지만 이후 안정화되어 압축공기 인입·인출과 연동된 누출 거동을 보임을 알 수 있다.

그림 11은 저장공동 주변 가스포화도 및 유체압력 분포를 나타낸 것으로 저장공동 천정부 및 측벽 하단부에서 콘크리트 라이닝 인장균열을 통한 가스포화도 및 유체압력의 국부적 증가를 확인할 수 있다. 저장공동 천정부와 측면부 콘크리트 라이닝에서는 최대 10배까지의 변형률이 발생하고 변형 후 라이닝 투과계수는 $5.0 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 에서 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 범위에 분포하여 초기 콘크리트 라이닝의 투과계수 $1.0 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 에서 인장균열발생으로 크게 증가하는 결과를 보였다.

한편, 콘크리트 라이닝의 인장파괴에 의한 투과특성 증가에도 불구하고 저장공동 내 압축공기 압력은 일정하게 유지되는 결과를 확인하였으며(그림 10(a)), 라이닝 균열을 통한 공기누출량(최대 $4.0 \times 10^{-5} \text{kg/s}$)은 인입량($2.2 \times 10^{-2} \text{kg/s}$)의 약 0.02%에도 못 미치는 결과를 보였다. 이는 2차 기밀시스템으로서의 주변 암반이 충분한 기밀성능을 발휘하여 콘크리트 라이닝을 통한 공기누출량이 인입량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문으로 콘크리트 라이닝의 국소적인 인장파괴 후에도 복공식 지하 압축공기에너지 지하저장 공동이 안전하게 운영될 수 있음을 보여준다. 다만, 본 해석결과는 콘크

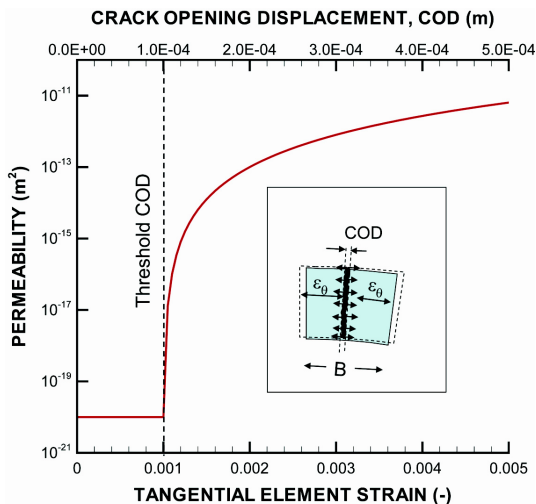


그림 9. 콘크리트 라이닝의 역학적 변형에 따른 투과특성 변화 모델

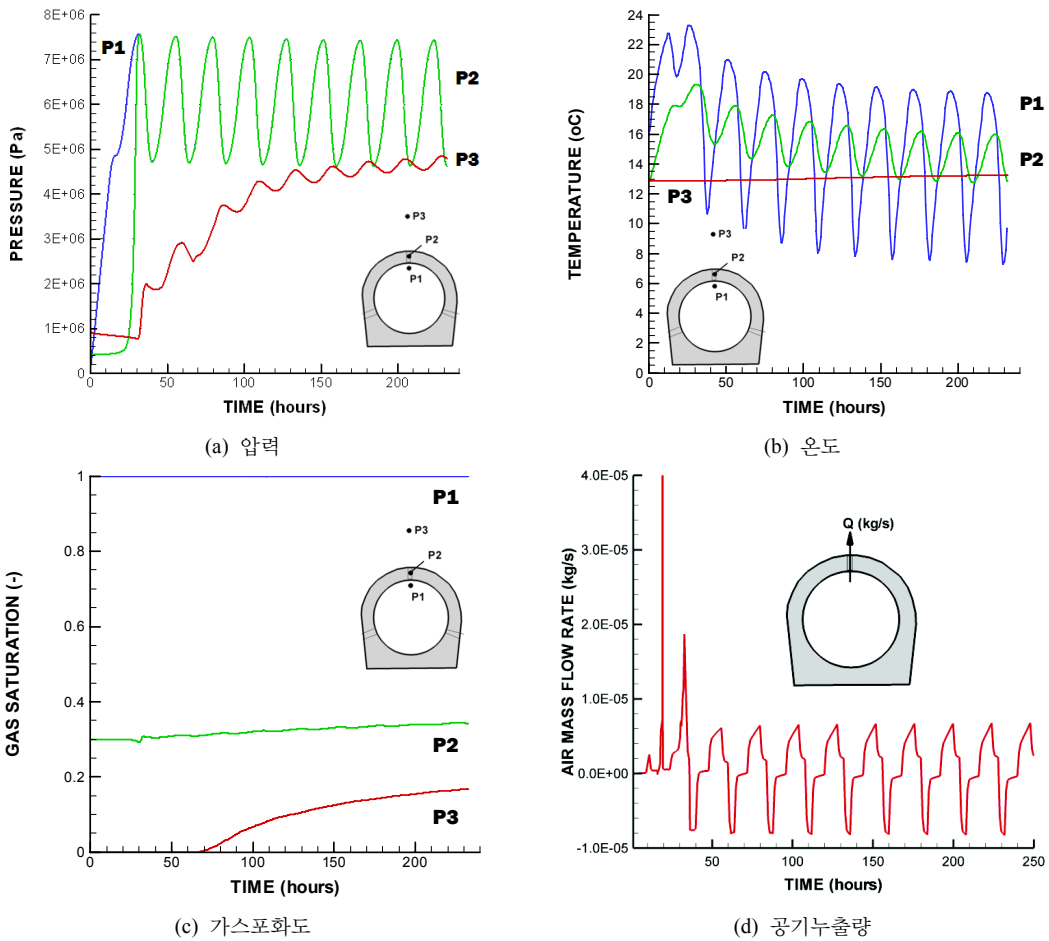


그림 10. 역학적 변형에 따른 콘크리트 라이닝 투과특성 변화모델을 이용한 지하 압축공기에너지 저장공동 주변 (a) 압력, (b) 온도, (c) 가스포화도 및 (d) 공기누출량 계산결과

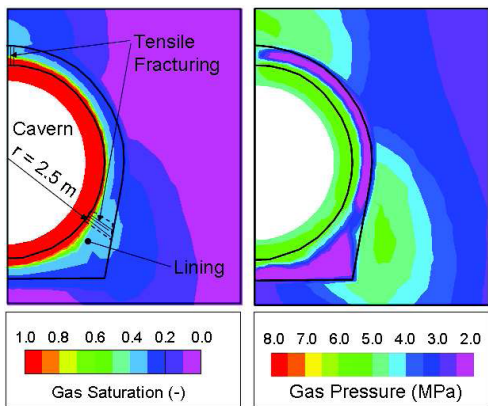


그림 11. 콘크리트 라이닝의 역학적 변형 및 투과특성 변화를 고려한 지하 압축공기에너지 저장공동 주변 해석결과 (a) 가스포화도 및 (b) 유체압력 분포

리트 라이닝의 장기간에 걸친 압축공기 인입·인출과정의 반복에 따른 피로파괴특성 및 시간 의존적 변형특성과 이에 따른 투과특성 변화, 고투과성의 콘크리트 라이닝과 암반사이의 불연속 구조 등을 고려하지 않았기 때문에 향후 이에 대한 추가적인 검토가 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 역학적 안정성 및 기밀성능의 파악을 목적으로 TOUGH-FLAC 연계해석을 실시하였다. 지하 압축공기에너지 저장 공동의 초기 및 장기 운영 과정에서 콘크리트 라이닝 내부에 발생하는 응력 양상을 살펴보고 저장공동 내부 압력 및 온도 변화를 파악함으로써 기밀성능을 평가하였다. 또한, 저장공동 주변 암반의 초기응

력분포가 콘크리트 라이닝 응력 발생양상에 미치는 영향을 살펴보았다. 최대 저장공동 운영압력 8 MPa 조건에서 콘크리트 라이닝 내부에서는 공기침투압에 의한 유효응력의 감소와 접선방향의 인장응력이 증가하기 때문에 설계단계에서 인장균열 발생에 따른 역학적 안정성 및 기밀성능에 대한 충분한 검토가 요구된다.

콘크리트 라이닝 내부의 인장균열 발생에 따른 투과 특성 증가 모델을 이용한 해석 결과, 저장공동 천정부 및 측벽부 일부에서 인장파괴가 발생하여 저장공동 압력과 콘크리트 내부 유체압력이 동일한 거동을 보였다. 이들 영역에서의 투과계수는 초기 $1.0 \times 10^{-20} m^2$ 에서 $5.0 \times 10^{-13} m^2$ 까지 증가하였다.

콘크리트 라이닝 내부 인장균열 발생 및 투과특성 증가에도 불구하고 저장공동 내부 압축공기 압력은 주변 암반의 기밀성능으로 인해 일정하게 유지되어 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 유효성을 확인할 수 있었다. 그러나, 주변 암반이 충분한 기밀성능을 발휘하기 힘든 현장조건에서는 콘크리트 라이닝 균열 발생 및 이를 통한 공기 누출을 방지하기 위하여 철근 콘크리트의 사용 및 라이닝 안쪽에 고무시트 등과 같은 기밀보조재의 추가적인 시공 등이 검토되어야 할 것이다.

한편, 본 해석에서는 콘크리트 라이닝 및 암반의 시간 의존성 변형특성, 인입·인출과정의 반복을 통한 피로파괴 거동은 고려되지 않았기 때문에 장기적 운영과정에서의 성능평가를 위해서는 이들 요소들을 반영한 검토가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김택근, 김지연, 이진무, 2008, 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망, 한국암반공학회 춘계학술대회논문집, pp. 123-131.
2. 김형목, Jonny Rutqvist, 류동우, 선우춘, 송원경, 2011a, 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동 기밀시스템 설계변수의 민감도 해석, 터널과 지하공간, 21(4), pp. 287-296.
3. 김형목, 박도현, 류동우, 최병희, 송원경, 2011b, 복공식 지하 압축공기에너지 저장공동의 열역학적 에너지수지 분석, 터널과 지하공간, 21(4), pp. 297-306.
4. 박도현, 김형목, 류동우, 신중호, 송원경, 2011, 압축공기에너지 저장 공동의 콘크리트 플러그 최적 형상에 대한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, 21(3), pp. 164-173.
5. 이연규, 박경순, 송원경, 박철환, 최병희, 2009, 압축공기 저장용 터널에 설치된 콘크리트 라이닝의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 19(6), pp. 498-506.
6. 이연규, 송원경, 박철환, 최병희, 2010, 압축공기 저장용 파일렛 터널에 설치된 콘크리트 플러그의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 20(6), pp. 446-454.
7. Alonso E.E., Alcoverro J., et al. (26 co-authors). 2005, The FEBEX Benchmark test. Case definition and comparison of modelling approaches. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42, pp. 611-638.
8. Corey A.T. 1954, The interrelation between oil and gas relative permeabilities. Producers Monthly November pp. 38-41.
9. Finsterle S., Pruess K. 1995, Solving the estimation-identification problem in two-phase flow modeling. Water Resources Research 31, pp. 913-924.
10. Hosseini, M., Bindiganavile, V., Banthia, N., 2009, The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review. Cement & Concrete Composites 31, pp. 213-220.
11. Itasca, 2009, FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 4.0. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, pp. 438.
12. Pepper, D., Utility Power Storage Technologies, BCC Research, 2008.
13. Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 User's Guide Version 2.0, LBNL-43134.
14. Rutqvist, J., Wu, Y.S., Tsang, C.F. and Bodvarsson, G., 2002, A Modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 39, pp. 429-442.
15. Rutqvist J., 2010, Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. Computers and Geosciences, doi:10.1016/j.cageo.2010.08.006.
16. van Genuchten M.T. 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898.



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
1996년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



Jonny Rutqvist

1988년 Msc., Geotechnology, 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



신중호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원