

지하 복공식 압축공기에너지 저장 (CAES) 실증시설의 콘크리트 라이닝 구조체 및 주변 암반 기밀특성의 현장실험 평가

김형목, 박도현, 류동우, 신중호, 송원경 (한국지질자원연구원)

1. 서 론

최근 신재생에너지 보급 확대에 따라 전력에너지저장시설에 대한 관심이 높아지고 있다. 압축 공기 지하저장기술 (CAES, Compressed Air Energy Storage)은 잉여전력 혹은 저품질의 신재생에너지원 전력을 이용하여 전력에너지를 압축공기로 전환하여 지하저장공동에 저장해 두고 필요시 저장된 압축공기를 전력에너지로 변환하여 사용하는 대용량 전력에너지 저장기술이다. 압축공기 지하저장 공동은 콘크리트 라이닝으로 대표되는 지보재 및 기밀시스템의 설치유무에 따라 무복공식과 복공식으로 구별된다 (한국지질자원연구원, 2009).

복공식 압축공기 지하저장공동에서는 암반 균열을 통한 저장압축공기의 누출을 방지하기 위하여 콘크리트 라이닝을 설치하고 이를 통해 기밀성을 확보할 수 있다. 일차적 기밀성은 콘크리트 라이닝 내부에 설치되는 고무재질의 기밀시트가 담당하게 되나, 현장 시공과정에서 발생 가능한 기밀시트 접합부의 부정합 및 파손에 따른 누기(漏氣)에 대한 이차적 기밀성은 콘크리트 라이닝이 담당하게 된다. 콘크리트 라이닝은 저장공동의 역학적 안정성을 함께 도모할 수 있다.

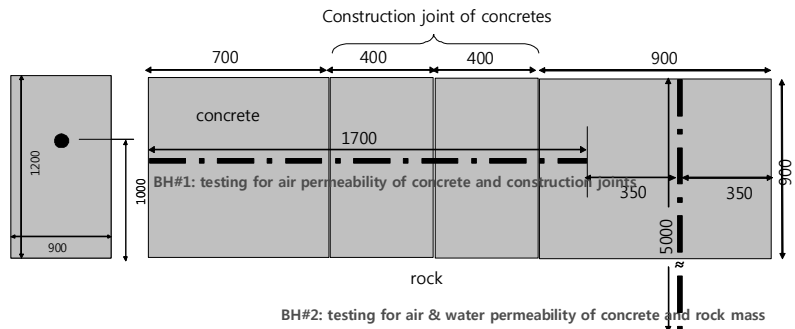
현장시공과정에서 발생하는 신규(新舊) 콘크리트 접합면인 시공이음부 (construction joint)에는 상대적으로 큰 공극들이 다수 형성되어 이를 통한 저장공기의 대량 누출이 발생할 수 있다. 김형목 등 (2010)은 콘크리트 모형시료를 이용한 투기 및 투수시험을 통하여 콘크리트 매질 및 시공이음부의 투과특성을 파악하고 시공이음부의 투과계수 (intrinsic permeability)가 매질에 비해 약 10배에서 10^4 배 정도까지 클 수 있음을 보고한 바 있다.

압축공기 지하저장공동 주변에는 굴착 손상으로 인한 영향 영역 (EDZ, Excavation Disturbed Zone)이 존재하여 이차적 기밀시스템으로서의 주변 암반의 기능 저하를 가져올 뿐만 아니라 역학적 안정성에도 영향을 미치게 된다. 저장공동 주변 수리학적 굴착손상영역의 파악 및 정량적 기밀성능 평가를 위해서는 특수하게 설계된 실험장치가 요구된다 (김형목 외, 2008).

본 연구에서는 지하 복공식 CAES 시설의 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 라이닝 구조체 및 주변 암반의 기밀특성 파악을 목적으로 CAES 실증시설 부지에서 현장기밀실험을 실시하였다. 현장실험에서는 콘크리트 라이닝 및 주변 암반을 관통하는 시추공을 굴착하고 현장시험과정에서 얻어진 시간-압력-유량 계측값을 이용하여 고유투과계수값을 산출하여 기밀특성을 평가하였다. 또한, 콘크리트 라이닝 매질 및 시공이음부에서의 투과특성을 비교·평가하였다.

2. 현장실험 개요, 실험장치 및 방법

현장실험은 압축공기에너지 지하저장 실증시설이 위치한 강원도 정선군 소재 한덕철광 신에미 광산 내 지하갱도에서 실시하였다. 실증시설 부지는 석회암층이 우세한 지질로 시추공 영상촬영 장치를 이용한 시추공벽 조사 결과를 바탕으로 실험구간을 선정하였다. 실제 실증시설 콘크리트 라이닝에의 실험용 시추공 굴착이 압축공기 저장공동의 기밀성에 미칠지 모르는 영향을 고려하여 실험용 콘크리트 라이닝 구조체를 저장공동 입구부에 별도로 제작하였다. 콘크리트 구조체 사양은 길이 2400 mm x 높이 1200 mm x 폭 900 mm로 실증시설 저장공동용 콘크리트 라이닝과 동일한 배합 및 타설 조건으로 제작되었다 (그림1a). 실험용 시추공은 콘크리트 매질 및 시공이음부의 투과특성을 비교할 목적으로 길이방향으로 굴착된 1700mm 길이 1공 (그림1b), 굴착손상영역 및 주변 암반의 투과특성을 측정할 목적으로 공동 벽면에 수직한 방향으로 시공된 5000mm 길이의 2공이다 (그림1c). 현장기밀실험장치는 콘크리트 모형블록을 이용한 실내실험 (김형목 외, 2010)과 동일한 사양으로 현장 적용성을 검증은 겸하였다.



(a) 콘크리트 구조체 사양 및 실험용 시추공 위치



(b) 콘크리트 및 시공이음부 투과특성 실험 모습 (c) 콘크리트 및 주변 암반 투과특성 실험 모습

그림 1. 압축공기 지하저장 실증시설 내 기밀특성 현장실험용 콘크리트 구조체 및 실험 모습

3. 실험결과

실험결과는 매질을 통과하는 유체특성과는 무관한 재료상수로서 매질의 공극구조 및 연결성에

의한 투과특성을 나타내는 고유투과계수 (intrinsic permeability)를 이용하여 평가하였다. 고유투과계수와 일반적인 투수계수 사이에는 식(1)과 같은 관계가 성립한다.

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k \quad (1)$$

여기서, K 는 투수계수 (hydraulic conductivity, m/s), k 는 고유투과계수 (m^2), ρ 는 유체밀도 (kg/m^3), g 는 중력가속도 (m/s^2), μ 는 유체점성도 (Pa·s)이다.

고유투과계수값은 대수층의 투수성 추정을 위한 우물 수리시험과 동일한 방식으로 유량을 변화시킴으로써 대상 매질에 불균형 충격 (impulse)을 유발하고 이로 인해 발생하는 압력 반응을 관측함으로써 대상 매질의 투과계수를 추정하게 된다. 투과계수를 추정하는 과정은 이론적 압력 반응 곡선과 관측된 압력 반응 히스토리를 비교함으로써 가장 근접한 결과를 보이는 대상 매질 투과 특성들의 조합을 찾아내는 과정에 해당한다. 그림2는 이러한 히스트리매칭을 통해 순간충격주입시험 및 정압주입시험 과정에서의 투과계수를 추정한 결과를 나타낸다.

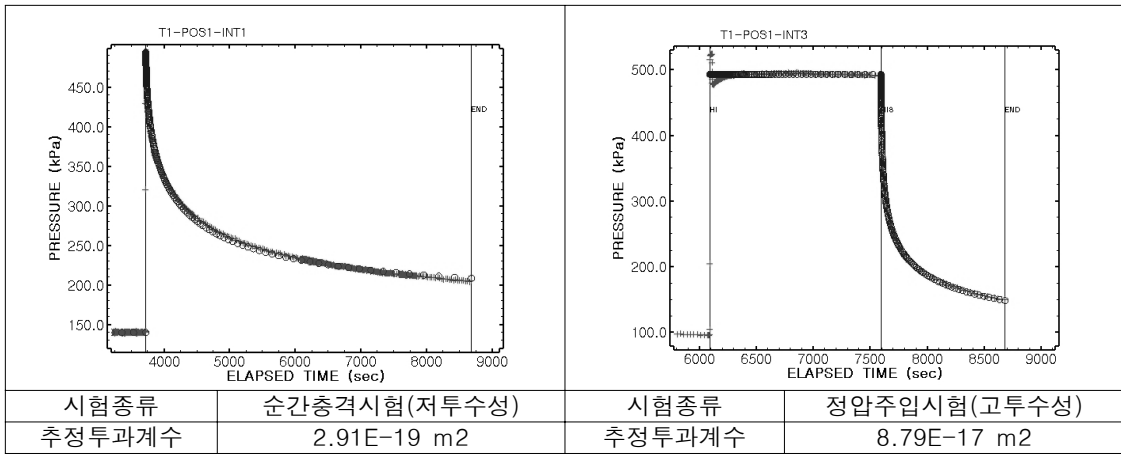


그림 2. 순간충격시험 및 정압주입시험과정에서의 투과계수 추정 결과
(붉은색 +: 압력계측결과, 파란색 O: 추정투과계수를 이용한 이론압력반응)

그림3은 각 시험과정에서 얻어진 콘크리트 구조체 및 주변 암반의 투과계수 추정치를 공동 벽면으로부터의 거리의 함수로 표시한 것이다. 벽면으로부터 90cm까지에 해당하는 콘크리트 구조체의 투과계수값은 $10^{-20} \sim 10^{-19} m^2$ 범위에 분포하고 콘크리트와 주변 암반 사이의 경계에서 부정합면이 형성되어 급격한 투과특성의 증가를 확인할 수 있다. 공동 벽면으로부터 5m까지의 주변 암반의 투과계수값은 $10^{-20} \sim 10^{-18} m^2$ 에 분포하는 것으로 분석되었다. 벽면으로부터 1.5m (암반 굴착면으로부터 60cm)구간에서 보이는 $10^{-17} \sim 10^{-16} m^2$ 의 투과계수는 암반내 존재하는 균열의 영향으로 시추공 벽면 영상촬영 결과 확인되었다.

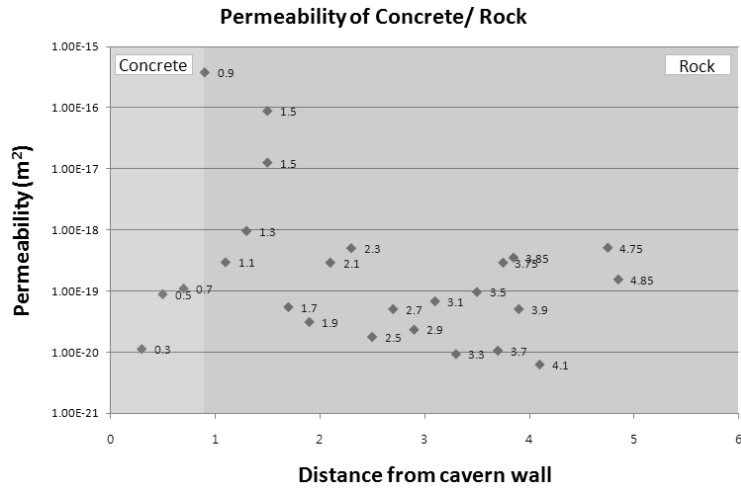


그림 3. 콘크리트 구조체 및 주변 암반의 투과계수 추정치 분포

그림4는 콘크리트 매질과 시공이음부의 투과계수 추정결과를 비교한 것이다. 콘크리트 매질의 투과계수는 $10^{-18} m^2$ 수준으로 시공이음부의 $10^{-14} m^2$ 에 비해 약 10^4 배 정도 차이를 보였다. 이는 기존의 콘크리트 모형블록을 이용한 시험결과 (김형목 외, 2010)에서도 관측된 결과로 콘크리트 라이닝 복공식 저장공동의 기밀성능 확보를 위해서는 이들 시공이음부의 투과특성 품질관리가 중요함을 알 수 있다.

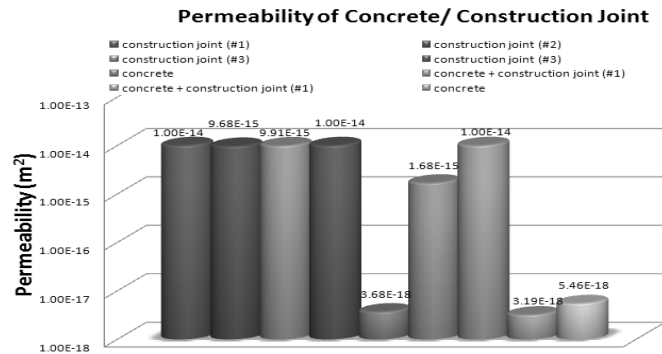


그림 4. 콘크리트 매질 및 시공이음부의 투과계수 비교

4. 결론

압축공기에너지 지하저장 실증시설의 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 구조체 및 주변 암반의 기밀특성 파악을 위한 현장시험을 실시하였다. 콘크리트 라이닝 매질의 고유투과계수값은 $10^{-20} \sim 10^{-19} m^2$ 범위에 분포하였고, 주변 암반의 고유투과계수값은 암반내 불규칙하게 분포하는 균열의 영향으로 $10^{-16} m^2$ 수준까지 분포범위가 증가하였다. 저장공동 벽면에서의 거리에 따른 암반 투과계수의 변화를 분석한 결과, 저장공동 벽면 부근에서는 열린 균열의 존재로 투과특성이 증가하였으나 굴착에 의한 수리학적 손상영역 (EDZ)의 평가를 위해서는 추가적인 조사가 이루어

저야 할 것으로 보인다. 콘크리트 매질 및 주변 암반에 비해 상대적으로 높은 투과계수값을 보인 콘크리트 시공이음부 및 콘크리트 라이닝과 주변 암반 경계가 누출 발생 시 압축공기의 주요 누출 경로가 될 수 있음을 확인하였다.

실증시설 부지에서의 현장기밀실험을 통해 얻어진 콘크리트 라이닝 및 주변 암반의 고유투과계수값은 실증시설의 역학적 안정성 및 기밀성능 예측해석을 위한 수치해석의 입력자료로서 활용되며 향후 계측결과와의 비교·분석·검증 과정을 통해 성능 예측 정밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 김형목, 류동우, 신중호, 2008, 굴착영향영역 투수특성의 실험적 평가기술, 터널과 지하공간, 18(2), pp.91-97.
2. 김형목, 류동우, 신중호, 송원경, 2010, 모형실험을 통한 콘크리트 블록 및 시공이음부의 기밀성 측정, 터널과 지하공간, 20(6), pp.434-445.
3. 한국지질자원연구원, 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발, 지식경제부, GP2009-019-2009(1), 2009.