

## 모형실험을 통한 콘크리트 블록 및 시공이음부의 기밀성 측정

김형목<sup>1)</sup>, 류동우<sup>1)\*</sup>, 신중호<sup>2)</sup>, 송원경<sup>2)</sup>

### Measurement of Air Tightness of Concrete Block and its Construction Joint from a Model Experiment

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

**Abstract** Underground compressed air energy storage (CAES) system in a lined rock cavern is considered one of the promising large-scale energy storage technologies. In this study, permeabilities of concrete lining block and its construction joint, which are the major components of an air tightness system of the underground CAES, were measured from a model experiment. From the experiment, it was found that intrinsic permeability of construction joint was larger than that of concrete block by the order scale of  $10^1 \sim 10^4$ , so that it would be very important to control the quality of construction joints in-situ in order to secure air tightness of storage system. And the permeability of construction joint could be decreased as low as that of the concrete block by pasting an acrylic-type adhesive on bonding surfaces. Higher degrees of water saturation of the concrete block resulted in the lower permeability, which is more preferable in the viewpoint of air tightness of storage cavern.

**Key words** underground compressed air energy storage (CAES), lined rock cavern, construction joint, intrinsic permeability, air tightness

**초 록** 대용량 전력에너지저장시설로서의 복공식 압축공기 지하저장시설의 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 라이닝 및 현장 타설 과정에서 발생하는 시공이음부의 투기특성을 파악하고자 콘크리트 블록시료를 이용한 모형실험을 수행하였다. 시공이음부의 투과계수는 콘크리트 블록보다 약  $10^1 \sim 10^4$  배 정도의 투과성이 큰 것으로 파악되어, 현장 타설과정에서 시공이음부의 품질관리가 저장시설의 기밀성능 확보 관점에서 매우 중요함을 확인하였다. 또한, 접합면에 아크릴계 접착제를 타설함으로써 시공이음부의 투과계수를 콘크리트 블록 수준까지 감소시킬 수 있었으며 콘크리트 블록의 초기 수분함량이 높을수록 투과계수가 감소하여 기밀성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**핵심어** 압축공기 지하저장, 복공식, 시공이음부, 투과계수, 기밀성

## 1. 서 론

최근 신재생에너지 보급 확대에 따라 대용량 전력에너지저장의 관심이 높아지고 있으며, 이를 위한 시스템으로 압축공기 지하저장기술이 주목을 받고 있다. 압축공기 지하저장기술은 잉여전력 혹은 저품질의 신재생에너지원 전력을 이용하여 전력에너지를 압축공기로

전환하여 지하저장공동에 저장해 두고 필요시 저장된 압축공기를 전력에너지로 변환하여 사용하는 기술이다. 압축공기 지하저장 공동은 콘크리트 라이닝으로 대표되는 지보재 및 기밀시스템의 설치유무에 따라 무복공식과 복공식으로 구별된다(김형목 외, 2009).

복공식 압축공기 지하저장공동에서는 암반 균열을 통한 저장압축공기의 누출을 방지하기 위하여 콘크리트 라이닝을 설치하여 기밀성을 담보하고 저장공동의 역학적 안정성도 함께 도모할 수 있다. 복공식 지하저장공동의 일차적 기밀성은 콘크리트 라이닝 표면에 설치되는 고무재질의 기밀시트에 의해 담보되나 현장 시공과정에서 발생가능한 기밀시트 접합부의 부정합을 통한 누출 및 장기적 관점에서의 기밀시트 파손부를 통한 누출 방

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

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

\* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 11월 7일

심사 완료일 : 2010년 12월 3일

게재 확정일 : 2010년 12월 8일

지를 위한 이차적 기밀성은 콘크리트 라이닝이 담당하게 된다. 또한, 주변 암반 역시 누출된 압축공기가 확산되는 것을 방지하는 자연방벽 역할을 담당하게 된다.

대규모 지하저장공동 콘크리트 라이닝의 현장타설과정에서는 신구(新舊) 콘크리트의 접합면인 시공이음부(construction joint)가 필연적으로 발생한다. 이러한 시공이음부는 서로 연결된 상대적으로 큰 공극이 내재하고 따라서 콘크리트 라이닝 매질보다 훨씬 높은 투기특성을 보일 것으로 예상된다. 따라서, 압축공기 지하저장공동의 기밀성 평가를 위해서는 콘크리트 라이닝 매질뿐만 아니라 콘크리트 라이닝 시공이음부의 투기특성을 정확히 파악하여 정량화 할 필요가 있다.

콘크리트 및 시공이음부의 투기특성은 주로 실내실험을 통해 물-시멘트비, 양생시간 및 온도와 같은 배합조건에 따른 투기특성의 변화양상이 파악되어 왔다. Neville (1996), Mehta et al.(2005), Sanjuan et al.(1996) 등에 의하면 물-시멘트비가 0.38에서 0.71의 범위에서 콘크리트 투수계수는  $10^{-17}$ 에서  $10^{-21}$  m<sup>2</sup>까지 변화한다고 보고된 바 있다. 또한, 동일한 물-시멘트비에서는 양생시간이 증가할수록 투수계수는 감소하는 것으로 보고되었으며, Sanjuan et al.(1996)은 물-시멘트비, 양생온도, 시험압력 등이 콘크리트 투기계수에 미치는 영향을 조사하여 물-시멘트의 변화에 따른 투기계수의 변화가 가장 크고, 시험압력의 영향은 크지 않다는 결과를 보고한 바 있다. 국내에서는 콘크리트의 압축강도와 투기성 사이의 관련성을 세공구조 특성과 함께 규명하여 압축강도와 투기성은 반지수적 상관성을 가지고 이러한 상관성은 물-결합재비 및 양생시간에 따라 변화한다고 알려진 바 있다(소형석과 소양섭, 2000). 최근에는 진공투브를 이용한 초고속열차 개발과 관련하여 콘크리트 재질의 진공투브 단면적, 두께 및 투기성을 대상으로 투브내 진공유지를 위한 기밀성능을 해석적으로 검토하기 위한 기초자료로 콘크리트 투기성을 실험적으로 구한 바 있다(박주남과 여인호, 2009).

시공이음부의 투과특성에 대한 기존 연구자료는 극히 찾아보기 힘들어, 시멘트 모르타르를 이용한 실내실험을 통해 시공이음부가 시간경과에 따라 투수계수가 증가함을 보고한 Tezuka et al.(2007)의 연구와 신규 콘크리트 시공이음부의 투기특성에 영향을 미치는 요인으로 물-시멘트비, 시멘트 종류, 시공이음부 접합면의 거칠기를 대상으로 투기계수를 조사하여 물-시멘트비가 낮을수록, 조강시멘트를 사용할수록, 접합면을 거칠게 한 후 타설 할수록 투기계수가 감소하는 결과를 보고한 氏家 등(1995)의 연구가 있다.

한편, 콘크리트 라이닝 및 시공이음부의 기밀특성은

현장 타설과정에서의 습도 및 온도와 같은 환경조건, 현장 배합비 등과 같은 시공결과에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 또한, 기존의 실내투기실험은 주로 시멘트 페이스트를 이용하여 제작된 시료로 콘크리트 라이닝에 포함된 골재의 영향 등이 고려되지 않는 단점이 있다. 따라서, 다양한 콘크리트 배합 조건 및 현장조건을 모사한 실내실험을 통한 기본데이터 축적뿐만 아니라 실제 현장시험을 통한 평가를 병행함으로써 저장공동 기밀성능 평가의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

본 고에서는 압축공기 지하저장공동 시공현장에서의 기밀특성 평가를 목적으로 시추공을 이용한 기밀특성 평가장치를 사용하여 콘크리트 블록 시료를 이용한 투기 및 투수실험을 실시하고 콘크리트 라이닝 블록 및 시공이음부의 고유투과계수값을 산출하였다. 또한, 시공이음부의 기밀성능 향상을 위해서 접합면에 콘크리트 보수용 접착제를 도포함으로써 투과계수의 저감효과를 파악하고 초기포화도에 따른 투과계수 차이를 비교하였다. 이러한 시험결과는 압축공기 지하저장공동의 기밀성능 확보를 위한 현장시공과정에서의 품질관리를 위한 귀중한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

## 2. 배경이론

### 2.1 투과계수의 추정방법

투과계수 추정을 위해서는 대수층의 투수성 추정을 위한 우물 수리시험과 동일한 방식으로 유량을 변화시킴으로써 대상 매질에 불균형 충격(impulse)을 유발하고 이로 인해 발생하는 압력 반응(response)을 관측함으로써 대상 매질의 투과 특성을 추정하게 된다. 이러한 압력 반응에 영향을 미치는 대상 매질의 재료 특성으로는 투과계수, 저류 계수, 스킨(skin) 효과 등이 있다. 투과계수를 추정하는 과정은 이론적 압력 반응 곡선과 관측된 압력 반응 곡선을 비교함으로써 가장 근접한 결과를 보이는 대상 매질 투과 특성들의 조합을 찾아내는 것이다. 본고에서 투과계수는 물 또는 가스와 같은 유체를 통과시키는 공극구조를 나타내는 재료 특성이고 투수계수는 이러한 공극구조를 통해 물을 통과시키는 특성을, 투기계수는 가스를 통과시키는 특성을 지칭한다.

본 시험에서는 history matching 기법(Horne, 1995)을 이용하여 순간충격 주입시험(pulse injection test), 정류량 주입시험(constant rate injection test), 정압 주입시험(constant pressure injection test)을 통한 투과계수를 추정하였으며 이들 시험과정에서의 이론적인 압력 및 유량 반응 곡선은 표 1과 같다.

2.2 스킨(skin) 효과

대상 매질의 투과특성 측정을 위한 시추공 주위에는 대상 매질과 상이한 투과특성을 가지는 영역이 형성되어 압력반응 곡선의 변형을 가져올 수 있다. 이러한 스킨영역의 형성 원인으로서는 시추공 굴착시 형성되는 주변 영역의 손상, 심부 굴착시 사용되는 이수(泥水)에 의한 시추공벽 피복, 파쇄대에서의 시추공벽 붕괴방지를 위한 시멘팅 등을 들 수 있다. 시추공 굴착시 형성되는 주변 손상영역에서는 공동주변 굴착손상영역과 같이 투과특성이 주변 원지반 매질에 비해 증가하고, 반대로 이수에 의한 시추공벽 피복 및 시멘팅에 의해서는 스킨영역의 투과특성이 원지반에 비해 감소하게 된다. 대상 매질의 정확한 투과특성 추정을 위해서는 스킨영역의 형성유무 및 스킨영역에서의 투과특성도 함께 추정되어야 한다. 스킨 영역의 투과특성이 대상 매질의 투과특성보다 작을 경우 시추공 주변에서 압력 변동을 촉진 시키고(그림 1b에서  $\Delta P_{sn}$ 에 해당), 클 경우 완만한 압

력 변동 곡선을 가져온다(그림 1b에서  $\Delta P_{sp}$ 에 해당). 스킨 영역형성에 따른 압력 변동 곡선은 그림 1과 같다.

2.3 고유투과계수와 Klinkenberg 효과

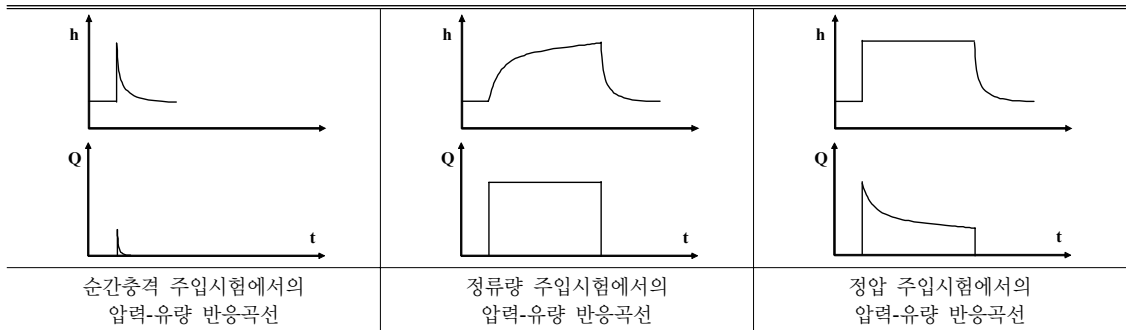
고유투과계수(intrinsic permeability)는 매질의 투과특성을 나타내는 재료상수로 매질의 공극 구조 및 연결성에 좌우될 뿐 매질을 통과하는 유체특성과는 무관하다. 투수계수(permeability 혹은 hydraulic conductivity)는 매질과 이를 통과하는 유체특성의 함수로 고유투과계수와 투수계수 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k \tag{1}$$

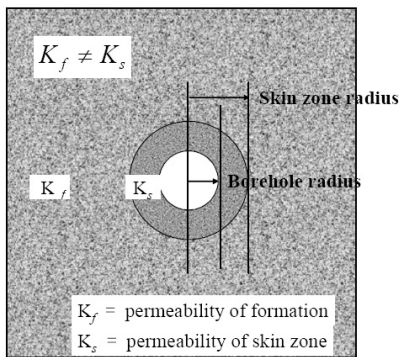
여기서,  $K$ 는 투수계수(hydraulic conductivity, m/s),  $k$ 는 고유투과계수( $m^2$ ),  $\rho$ 는 유체밀도( $kg/m^3$ ),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\mu$ 는 유체점성도( $Pa \cdot s$ )이다.

따라서, 이론적으로는 사용유체와 무관하게 고유투과

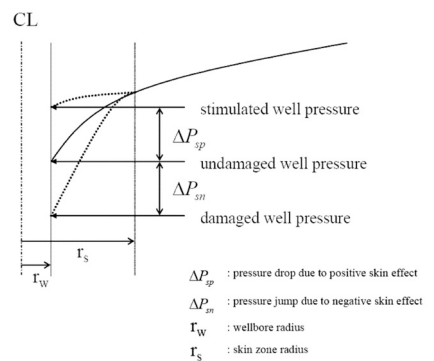
표 1. 투과계수 추정을 위한 대표적 압력-유량 반응곡선



(h: 압력(pressure 혹은 head), Q; 유량(flow rate), t: 경과시간(elapsed time))



(a) 스킨영역 개념도( $K_f$ 는 대상매질의 투과계수,  $K_s$ 는 스킨 영역의 투과계수)



(b) 스킨영역에서의 대표적 압력변동 곡선( $r_w$ 는 시추공 반경,  $r_s$ 는 스킨 영역 반경)

그림 1. 스킨영역 개념도 및 스킨영역 형성에 의한 압력변동 곡선

계수는 일정한 값을 보여야하지만 실제로는 가스를 이용하여 얻은 투과계수의 값이 물을 사용한 경우보다 큰 값을 보인다. 이러한 차이는 공극표면에서 발생하는 가스의 slip flow 때문으로 Klinkenberg 효과라 일컫는다. Klinkenberg 효과는 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$k_g = k_w \left(1 + \frac{4cl}{r}\right) = k_w \left(1 + \frac{c\kappa}{\pi\sqrt{2}r^3} \frac{T}{p}\right) = k_w \left(1 + \frac{b}{p}\right) \quad (2)$$

여기서,  $k_g$ 는 가스의 투과계수( $m^2$ ),  $k_w$ 는 물의 투과계수( $m^2$ ),  $l$ 은 가스의 평균투과거리(m),  $r$ 은 공극반경(m),  $\kappa$ 는 Boltzmann 상수( $JK^{-1}$ ),  $T$ 는 온도(K),  $c$ 는 상수,  $p$ 는 공극내 압력,  $b$ 는 Klinkenberg 상수(Pa) 이다.

식 (2)는 공극 크기가 작을수록, 가압하는 공극내 압력이 낮을수록, 온도가 높을수록 가스의 투과계수와 물의 투과계수의 차이가 증가한다는 것을 의미하고, 공극반경이 무한대가 될 경우 가스와 물의 투과계수는 일치함을 나타낸다. Jones(1972)는 물의 투과계수가  $10^{-12} \sim 10^{-17} m^2$  범위에서  $\log b$ 와  $\log k_g$  사이에는 선형관계가 있음을 보인 바 있다. 또한, Tanikawa et al.(2006)은 Klinkenberg 상수  $b$ 와 유체 투과계수  $k_w$  사이에는 식 (3)과 같은 관계가 있다고 보고하였다.

$$b[MPa] = (1.5 \pm 0.6 \times 10^{-7}) \times k_w^{-(0.37 \pm 0.038)} [m^2] \quad (3)$$

2.4 포화도에 따른 상대투과계수 곡선

공극 내에 두 개 이상의 유체(물, 가스, 공기 등)가 동시에 존재할 때 각 유체흐름은 간섭을 받게 된다. 각

유체의 유효투과계수는 고유투과계수에 대한 상대적인 비율로 나타낼 수 있으며 이를 상대투과계수(relative permeability)라 한다. 따라서, 상대투과계수는 0과 1 사이의 값을 가진다.

매질 내에 물과 가스가 존재할 경우 각각의 상대투과계수는 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$k_i = k_{r,i} k \quad (i: \text{물 혹은 가스}) \quad (4)$$

여기서,  $k_i$ 는 특정 성분*i*의 유효투과계수,  $k_{r,i}$ 는 특정성분*i*의 상대투과계수,  $k$ 는 매질의 총 고유투과계수를 나타낸다.

상대투과계수는 일반적으로 매질의 함수율(물 포화도)의 함수로 정의된다. 대표적인 상대투과계수 함수로는 식 (5)와 같은 van Genuchten 함수가 알려져 있다.

$$k_{r,y} = (1 - \bar{S})^p [1 - \bar{S}^{(1/m)}]^{2m} \quad (5)$$

여기서,  $\bar{S}$ 는 유효함수율이고,  $m$  및  $p$ 는 재료 상수이다.

또한, Abbs et al.(1999)는 보통포틀란트 시멘트를 이용한 실내실험을 실시하여 고유투과계수와 포화도 사이에 식 (6)과 같은 관계가 있음을 보고한 바 있다.

$$k = \ln[1.62/s^{0.108}] \times 10^{-16} \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 고유투과계수 [ $m^2$ ],  $s$ 는 포화도 [%]이다.

3. 모형실험을 위한 콘크리트 블록 제작

콘크리트 블록은 직육면체 모양(가로 × 세로 × 길이:

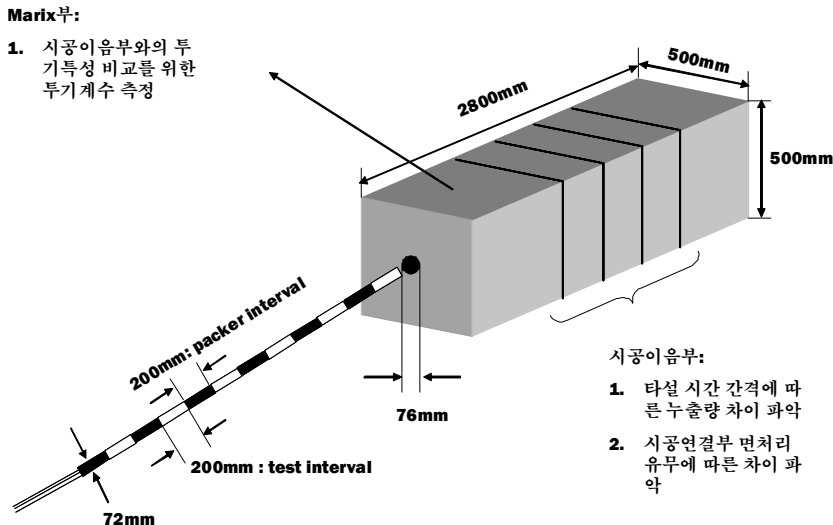
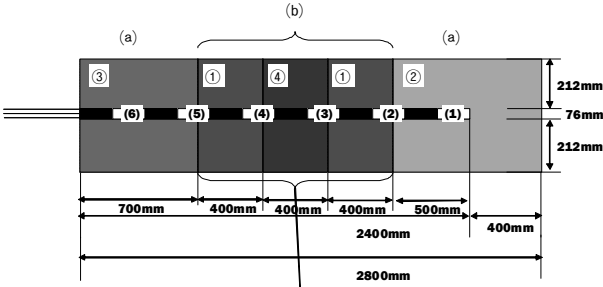
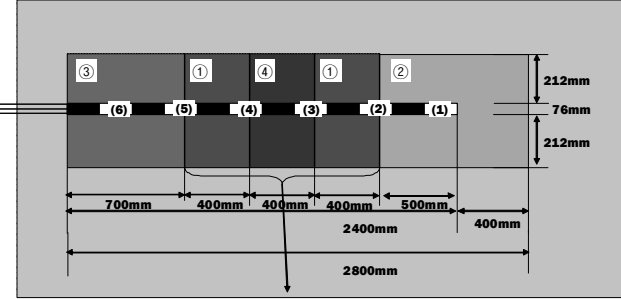
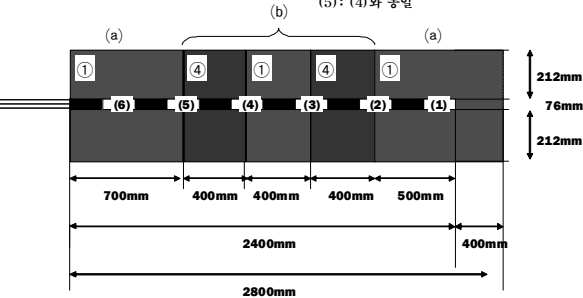


그림 2. 모형실험을 위한 콘크리트 블록시료 사양

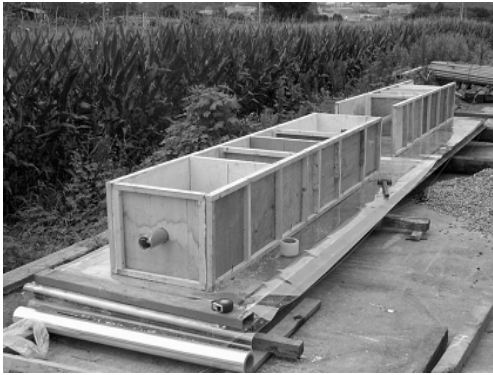
표 2. 시험목적별 콘크리트 블록 상세사양 및 제작방법

| 제작목적                            | 상세사양 및 제작방법  | 비고                                  |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| <p>콘크리트 및 시공이음부의 투과특성 비교</p>    | <p>시료명: <b>dry_air</b>, 제작목적: 건조(Dry)조건 투기시험용</p> <p>계측 위치 및 항목:<br/>                     (a): 변형용계 (@시료 상부 &amp; 좌/우측면)<br/>                     변위계(LVDT) (@시료 상부)<br/>                     (b): 균열계 (@시료 상부&amp;좌우측면 시공이음부)</p> <p>타설 순서 및 시기:<br/>                     ① 초기타설<br/>                     ② 초기타설하고 24hr 경과후<br/>                     ③ 초기타설하고 48hr 경과후<br/>                     ④ 초기타설하고 72hr 경과후</p>  <p>시험구간:<br/>                     - Matrix부: (1) &amp; (6)<br/>                     - 시공이음부: (2), (3), (4) &amp; (5)</p> <p>시공이음부 타설 시간차이:<br/>                     (2) 24시간/ (3) 72시간/ (4) 72시간/ (5) 48시간</p> | <p>건조상태에서 투기시험</p>                  |
| <p>투수시험 및 습윤상태의 투과특성 측정</p>     | <p>시료명: <b>satuated_air (water)</b>, 제작목적: 투수시험 &amp; 습윤(Wet)조건 투기시험용</p> <p>타설 순서 및 시기:<br/>                     ① 초기타설<br/>                     ② 초기타설하고 24hr 경과후<br/>                     ③ 초기타설하고 48hr 경과후<br/>                     ④ 초기타설하고 72hr 경과후</p> <p>수조 크기 (600 x 600 x 3200 mm)</p>  <p>시험구간:<br/>                     - Matrix부: (1) &amp; (6)<br/>                     - 시공이음부: (2), (3), (4) &amp; (5)</p> <p>시공이음부 타설 시간차이:<br/>                     (2) 24시간/ (3) 72시간/ (4) 72시간/ (5) 48시간</p>  | <p>수조에 침수시킨 후 7일간 포화</p>            |
| <p>시공이음부 면처리에 의한 투과특성 변화 비교</p> | <p>시료명: <b>interface_air</b>, 제작목적: 시공이음부 면처리에 따른 투과특성 변화용</p> <p>계측 위치 및 항목:<br/>                     (a): 변형용계 (@시료 상부 혹은 좌우측면)<br/>                     변위계(LVDT) (@시료 상부)<br/>                     (b): 균열계 (@시료 상부&amp;좌우측면 시공이음부)</p> <p>타설 순서 및 시기:<br/>                     ① 초기타설<br/>                     ④ 초기타설하고 72hr 경과후</p> <p>시공이음부 (타설시간차는 72hr) :<br/>                     (2): 아크릴 계열 접착제 (Nitobond EP)<br/>                     (3): (2)와 동일<br/>                     (4): 에폭시 계열 접착제 (Nitobond HAR)<br/>                     (5): (4)와 동일</p>   | <p>시공이음부를 콘크리트 보수용 접착제를 이용하여 접착</p> |

500 × 500 × 2800 mm)으로 기밀시험을 위한 시추공 (직경 76 mm, NX 코어에 해당)을 길이방향으로 배치하여 그림 2와 같이 제작하였다.

콘크리트 블록은 총 3개 제작되었으며 각각의 제작목적은 다음과 같다.

- 1) 건조상태에서의 복공재 콘크리트 및 콘크리트 시공이음부의 투과특성 비교를 목적으로 블록 내부에는 시공이음부를 인위적으로 설치
- 2) 투수시험 및 습윤상태에서의 투기시험 목적으로 별도의 시료를 제작하였으며 타설 후 7일간 별도로 제



(a) 콘크리트 블록 시료 제작을 위한 목재 거푸집 제작 모습



(b) 투수시험용 콘크리트 블록 시료 제작을 위한 목재 거푸집 제작 모습(바깥쪽은 수조 제작용 철재 프레임)



(c) 콘크리트 타설 모습



(d) 시추공 형성용 PVC 파이프 삽입 모습



(e) 시공이음부 접합면 아크릴계 접착제 타설 모습



(f) 거푸집 제거후 투수시험용 시료 포화 모습

그림 3. 콘크리트 블록시료 제작과정

작된 수조에서 포화

- 3) 시공이음부의 면처리 유무에 따른 투과특성의 차이를 비교할 목적으로 시공이음부에 콘크리트 보수용 접착제를 시공한 시료를 별도로 제작

각 시험목적별 콘크리트 블록의 상세 사양 및 제작방법은 표 2와 같다.

콘크리트 블록은 목재 거푸집 제작 후 24시간 간격으로 순차적으로 콘크리트를 타설함으로써 시공이음부가 발생하도록 하였다. 각 블록당 총 4회(표 2의 타설순서 ①~④)에 걸쳐 콘크리트를 타설하고 4개의 시공이음부(표 2의 시험구간 (2)~(5))가 포함되도록 제작하였다. 투수시험을 위한 블록 시료제작 시에는 수조 내부에 거푸집을 구축하고 타설 후 수조 안에 물을 채워 콘크리트 블록을 포화시켰다. 수조 길이방향의 면은 강도 확보를 위해 철판을 사용하였고 좌우 측면은 관찰 목적으로 투명한 아크릴판을 사용하였다. 기밀시험용 시추공은 콘크리트 타설 전에 PVC 파이프를 사전에 길이방향으로 설치 해 두고 타설 후 빼어냄으로써 시추공과 같은 원형 빈 공간을 형성하였다(그림 3(d)).

시공이음부의 면처리는 1차 콘크리트 타설(표 2의 타설순서 ①) 72시간 경과 후 타설(표 2의 타설순서 ④) 직전에 접합면에 접착제를 표면에 바르고 콘크리트를 타설하여 접착 효능을 향상시켰다(그림 3(e)). 시공이음부 접합면 면처리용 접착제로는 영국 Nitobond사의 에폭시 계열(EP) 및 아크릴계열(HAR) 접착제를 사용하였다.

모형실험 콘크리트 블록시료 제작과정 및 사용한 콘크리트 배합설계는 그림 3 및 표 3과 같다.

4. 기밀특성 시험장치 및 시험방법

4.1 시험장치 개요

본 장치는 기존의 굴착공동 주변 손상영역의 투수특성 측정을 위한 장비(김형목 외, 2008)를 기밀시험목적으로 업그레이드한 것으로 크게 시추공에 삽입되는 패커(packer) 부분과 팩커 및 시험구간의 압력 및 유량을 조절하는 부분으로 구성된다(그림 4 및 그림 5). 패커부분은 일반적으로 사용되는 NX 시추공 사이즈에 맞게 설계되었으며 그림에서 검게 표시된 부분이 고무재질

표 3. 블록시료 제작용 콘크리트 배합설계

|                        |   |
|------------------------|---|
| 콘크리트 종류                | 보통 콘크리트   |
| 설계배합강도(MPa)            | 35  |
| 슬럼프치(mm)               | 150   |
| 굵은 골재의 최대치수에 따른 구분(mm) | 25  |
| 시멘트 종류                 | 포틀랜드 시멘트 1종   |
| 비고                     | 염화물량 0.3 kg/m <sup>2</sup> 이하<br>공기량(4.5±1.5)%<br>ΔE감수표준형<br>고로슬래그 미분말 20%<br>플라이애쉬 15% |

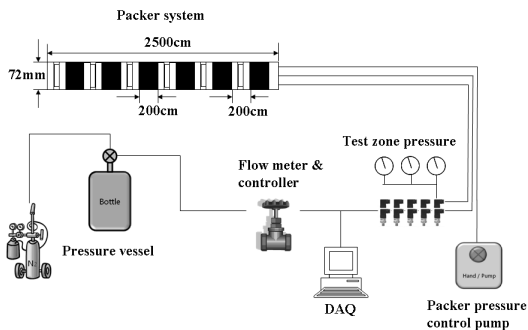


그림 4. 현장기밀특성 시험장치 구성 및 개념도



그림 5. 모형실험에 사용한 기밀특성 시험장치

팩커로, 팩커와 팩커사이의 빈 공간이 기밀특성을 측정하는 시험구간이 된다. 본 장치는 순간충격시험(pulse test), 정압시험(constant pressure test), 정류량시험(constant flow-rate test)을 실시하고 시험과정에서의 압력-유량 변동양상을 계측하여 투과계수를 추정할 수 있다.

**4.2 시험방법**

콘크리트 블록 중앙에 위치한 시추공에 시험장치의 팩커부를 삽입한 후 핸드펌프를 이용하여 팩커를 순차적으로 팽창시킨다. 팩커 팽창은 공기압 및 수압 모두를 이용할 수 있으나 벽면 밀착효과가 상대적으로 우수한 수압을 이용하여 팽창시켰다. 팩커 팽창압은 콘크리트 블록의 인장파괴에 의한 균열을 통한 누출경로가 형성되는 것을 방지하기 위하여 콘크리트 인장강도를 넘지 않는 수준에서 결정해야 한다. 콘크리트 인장강도는 일축압축강도의  $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{13}$  수준이므로 설계강도 35 MPa를 고려하여 본 시험에서는 팩커 팽창압으로 20 bar(약 2 MPa)를 설정하였다.

투기계수 측정을 위해서는 질소(N<sub>2</sub>) 가스를 이용하였으며 투수시험은 일반 수돗물을 이용하여 실시하였다. 팩커 팽창후 시험구간의 압력이 충분히 안정되면 표 2의 (1)~(6)까지의 시험구간에서 먼저 순간충격 주입시험을 실시하였다. 시공이음부를 포함한 시험구간에서는 일반적으로 투과성이 크기 때문에 순간충격 주입시험 과정에서의 압력변동곡선을 이용하여 투과계수를 추정하기가 곤란하다. 따라서, 이러한 시험구간에서는 정류량 주입시험 혹은 정압 주입시험을 실시하여 투과계수를 추정하였다.

순간충격 주입시험 및 정압 주입시험에서는 팩커 팽창압을 초과하지 않는 수준에서 주입압을 결정하였으며 정

류량 주입시험에서는 팩커 팽창압 및 유량계(flowmeter)의 용량을 고려하여 주입량을 결정하였다. 본 시험에서 주입압은 1~10 bar(0.1~1 MPa), 주입량은 10~4,000 g/hr 수준에서 시험구간의 투과정도에 따라 결정되었다. 순간충격 주입시험 및 정압 주입시험에서의 대표적인 압력 및 유량 변동 양상은 그림 6과 같다.

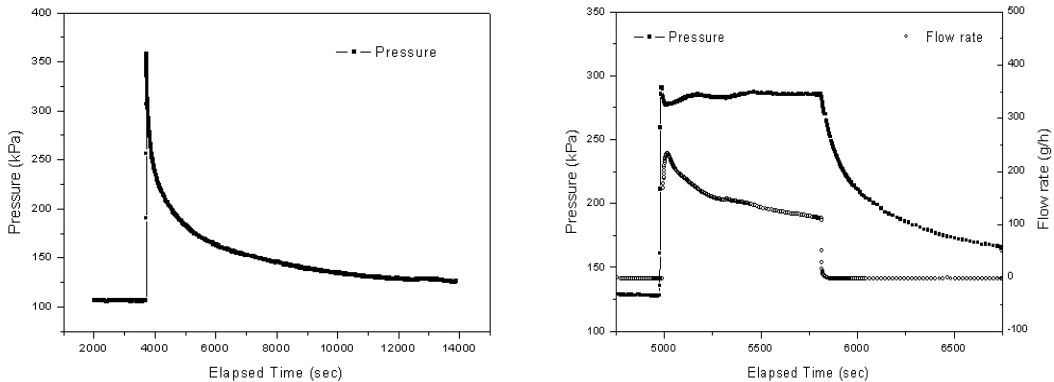
**4.3 시험결과**

시험과정에서 얻어진 압력 변동 곡선을 이용하여 전술한 투과계수 추정방식에 따라 히스토리매칭 해석을 실시하고 각 시험구간의 투과계수를 추정하였다. 표 4에 각 시험과정의 대표적인 추정결과를 요약하였다.

콘크리트 블록시료 제작과정에서 PVC 파이프의 인발을 돕기 위하여 파이프 표면에 구리스(grease)를 도포하였기 때문에(그림 7) 일부 시험구간에서는 시추공벽면에 구리스에 의한 저투과성의 스킨영역 형성을 고려한 모델을 사용하여 계측치를 보다 잘 설명할 수 있었다(표 5).

**4.3.1 콘크리트 블록 및 시공이음부의 기밀성능 차이**

콘크리트 블록 및 시공이음부의 기밀성능 차이를 살펴볼 목적으로 각 시험구간에서 추정된 투과계수를 비교해 보았다(그림 8). 그림에서 j는 시공이음부(joint)를 m은 콘크리트 블록(matrix)을 나타낸다. 시공이음부를 나타내는 j 뒤의 숫자는 시공이음부를 형성하는 좌우 두 블록의 타설시간차를 나타낸다. 시공이음부와 콘크리트 블록의 투과계수 사이에는 10<sup>1</sup>~10<sup>4</sup> 배까지의 투과계수 차이를 보이고 있어 저장공동의 기밀성능 확보를 위해서는 시공이음부의 투과계수 품질관리가 대단히 중요함을 알 수 있다.



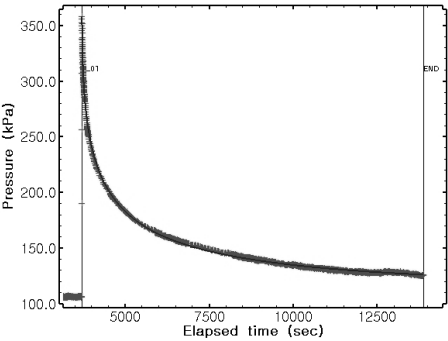
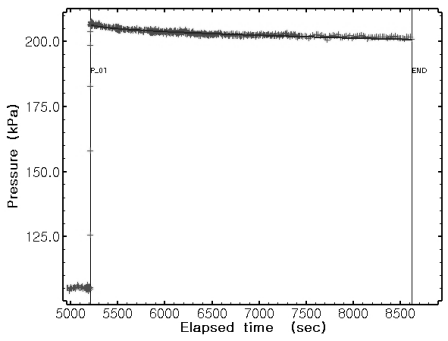
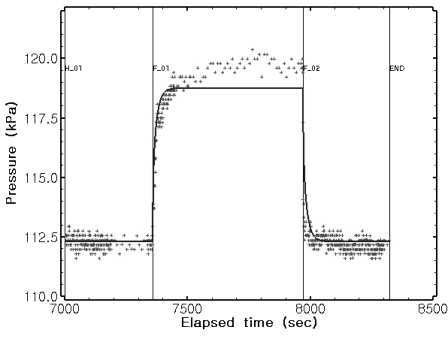
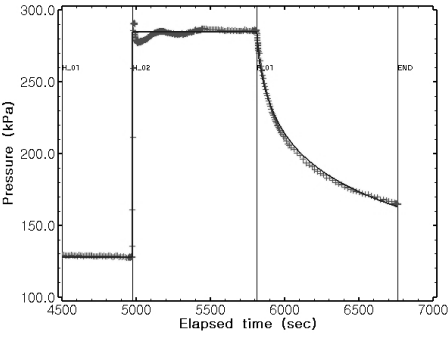
(a) 순간충격 주입시험 과정에서의 압력변동 곡선

(b) 정압 주입시험에서의 압력 및 유량 변동 곡선

**그림 6.** 시험과정에서 얻어진 대표적인 압력 및 유량 변동 곡선



표 4. 각 시험과정에서의 투과계수 추정결과

|  |                        |   |                        |
|--|------------------------|---|------------------------|
|   |                        |   |                        |
| 시험종류   | 순간충격시험(고투수성)           | 시험종류  | 순간충격시험(저투수성)           |
| 추정투과계수   | $9.17E-18 \text{ m}^2$ | 추정투과계수  | $2.71E-20 \text{ m}^2$ |
|  |                        |  |                        |
| 시험종류   | 정류량주입시험                | 시험종류  | 정압주입시험                 |
| 추정투과계수   | $1.36E-11 \text{ m}^2$ | 추정투과계수  | $2.50E-18 \text{ m}^2$ |

\*붉은색 굵은점: 계측치, 파란색 가는선: 해석치



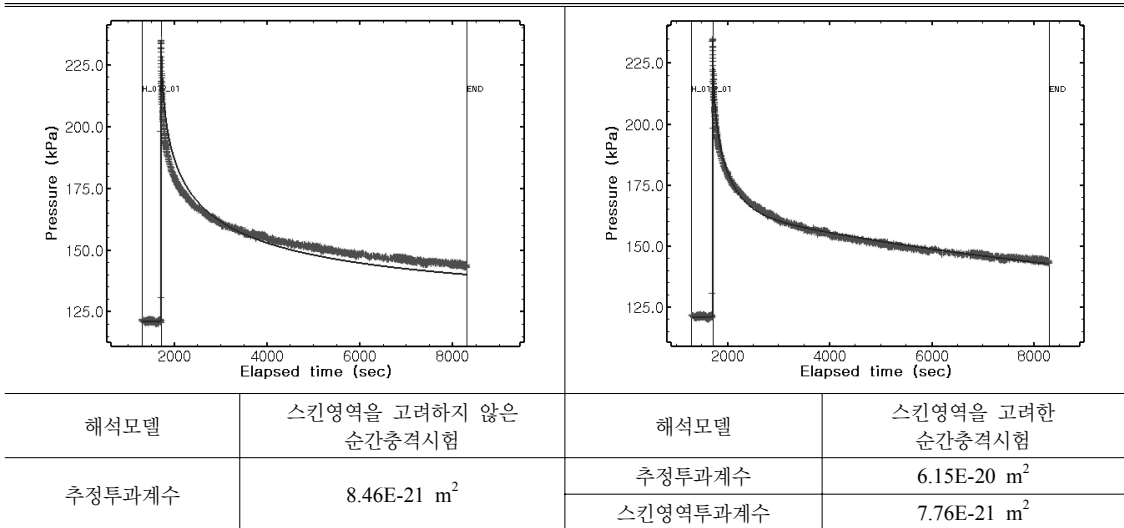
(a) PVC 파이프 표면에 grease를 도포한 모습



(b) 해체후 시공이음부 접합면에 grease가 남아 있는 모습

그림 7. PVC 파이프 표면 grease 도포 및 해체 후 시공이음부 모습

표 5. 시추공 벽면에 스킨영역 형성을 고려한 해석결과



(붉은색 굵은선: 계측치, 파란색 가는선: 해석치, 스킨영역 두께는 3 mm로 가정)

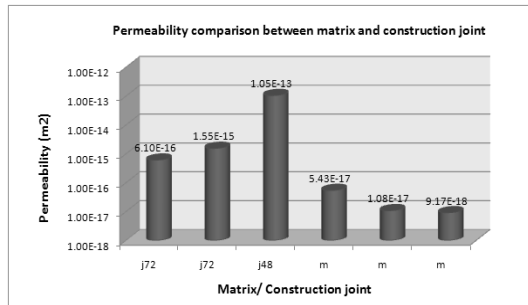


그림 8. 콘크리트 블록과 시공이음부 투과계수의 비교

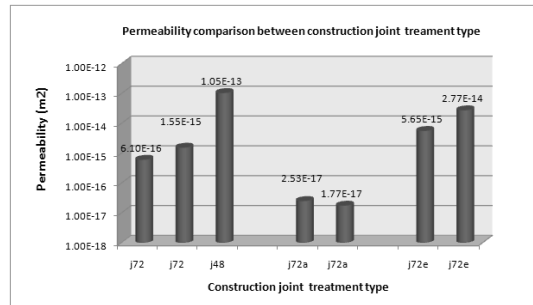


그림 9. 시공이음부 면처리 방식에 따른 투과계수의 비교

### 4.3.2 시공이음부 접합면 면처리에 따른 기밀성능 향상효과

콘크리트 시공이음부의 면처리에 따른 기밀성능 변화를 살펴볼 목적으로 시공이음부 접합면에 콘크리트 보수용 접착제를 도포한 경우와 그렇지 않은 경우의 투과계수를 비교해 보았다(그림 9). 접착제로는 Nitobond社의 에폭시 계열 접착제(EP)와 아크릴 계열 접착제(HAR)의 두 종류를 사용하였다. 그림에서 j72a는 아크릴 계열 접착제를, j72e는 에폭시 계열 접착제를 나타낸다. 에폭시 계열 접착제에 의한 기밀성능 향상 효과는 눈에 띄지 않았으나 아크릴 계열 접착제를 사용한 경우 투과계수 감소효과를 가져와 콘크리트 블록에 상응하는 기밀성능 향상을 가져올 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 에폭시 계열 접착제는 접착력이 우수하고 14일 경과 후

접착강도 역시 150 kg 정도로 20 kg의 아크릴 계열보다 높은 것으로 알려져 있으나 초기 접착도가 낮아 도포시 블록모형의 수직 단면을 따라 흘러내림이 발생하는 것이 블록 제작과정에서 관측되었다. 따라서, 시공이음부 접합면 면처리 방향으로 접착제 도포를 시행하기 위해서는 접착제 점성 및 시간경과에 따른 경화 특성 뿐만 아니라 접합면 거칠정도, 수분 상태 및 수직 단면 시공성 등에 대한 추가적인 조사가 실시되어야 할 것으로 사료된다.

### 4.3.3 콘크리트 초기포화도에 따른 차이

건조상태의 투과계수와 습윤상태의 투과계수를 비교함으로써 콘크리트 블록의 초기포화도에 따른 기밀성능을 비교해 보았다(그림 10). 건조상태 투과계수는 대

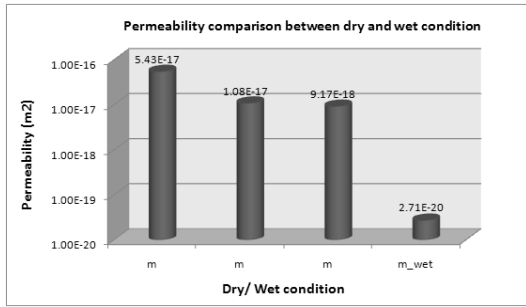


그림 10. 콘크리트 함수율에 따른 투과계수의 비교

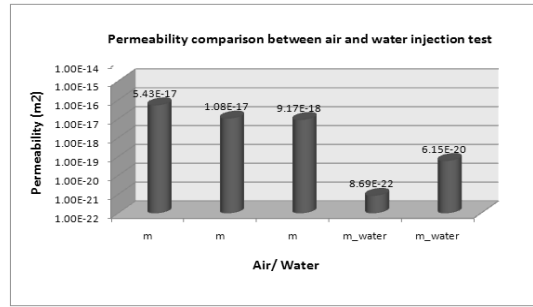


그림 11. 콘크리트 블록에서의 투기계수와 투수계수의 비교

기중에서 양생한 콘크리트 블록을 이용한 시험결과이고 습윤상태는 거푸집 제거후 수조 안에서 1주일간 포화시킨 블록시료 시험결과에 해당한다. 두 시료의 절대 포화도는 측정하지 않았으나 습윤상태가 상대적으로 높은 초기포화도 조건을 나타낸다.

그림에서 데이터 갯수가 충분하지 않은 한계점은 있으나 습윤상태의 투과계수 추정치가 약  $10^2 \sim 10^3$  배 까지 감소하는 결과가 관측되었다. 이는 전술한 상대투과계수 개념으로 설명이 가능한 결과로 공극수와의 저항에 따른 공기의 투과능 감소효과를 나타낸다. 전술한 고유투과계수와 포화도 함수의 관계식 식 (6)을 이용하여 투과계수 추정치로부터 건조상태와 습윤상태 블록 시료의 각각의 포화도를 역산하면 35%와 85% 정도의 포화도를 보였다(건조상태의 투과계수는 근접한 2개의 측정 평균값  $2.48E-17 \text{ m}^2$ 을 사용하였다).

따라서, 압축공기 저장장공동의 기밀성능 확보를 위해서는 라이닝 콘크리트의 초기 포화도를 가능한 높이고 운영과정에서는 라이닝 배면으로부터의 수분 공급을 통해 라이닝 콘크리트의 포화도를 일정수준이상으로 유지함으로써 기밀성능을 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4.3.4 투기계수와 투수계수의 비교

콘크리트 블록의 투기계수와 투수계수를 비교한 결과(그림 11), 투수계수 추정값이 투기계수에 비해  $10^2 \sim 10^5$  배 정도 작은 값을 보여 전술한 미세한 공극구조에서의 Klinkenberg 효과를 확인할 수 있었다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 투수계수 추정값으로부터 환산한 투기계수값은  $1.99E-19 \sim 1.19E-17(\text{m}^2)$  범위에 분포(투수계수 평균값:  $3.11E-20$ , 주입압 평균값: 5 bar(약 0.05 MPa)을 사용)하여 투기시험으로부터 구한 추정치보다 다소 과소평가 된 결과를 얻을 수 있었다. 이는 상기식이 퇴적암 시료를 이용한 실험결과로부터 얻어진 것으로 콘크리트 라이닝 재료에의 적용을 위해서는 추가적인 시험을 통한 수정식의 제안이 요구된다.

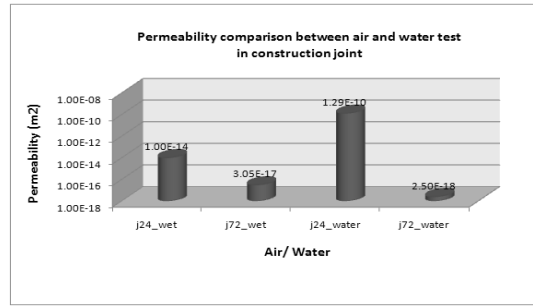


그림 12. 시공이음부에서의 투기계수와 투수계수의 비교

한편, 시공이음부에서는 콘크리트 블록에 비해 공극 크기가 커지고 충분한 투과 공간을 가지기 때문에 투기계수와 투수계수 추정치 사이에 이러한 관계를 찾아볼 수가 없었다(그림 12).

따라서, 압축공기 저장공동의 현장기밀특성 평가시 저투과성의 콘크리트 라이닝 블록에서는 수압시험이 아닌 가스주입시험을 실시하여 수압시험으로부터 환산된 투기계수가 아닌 시험결과로부터 직접 측정된 투과계수 값을 이용하고 고투수성의 시공이음부에서는 수압시험을 통한 투과계수값을 산출하여 저장공동의 기밀특성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

대용량 전력에너지저장시설로서 복공식 압축공기 지하 저장시설의 기밀시스템을 구성하는 콘크리트 라이닝 및 현장 타설 과정에서 발생하는 시공이음부의 투기특성을 콘크리트 블록 시료를 이용한 모형실험을 통해 파악하고 향후 실증 및 상용화 시설 건설에 참고자료로 삼고자 하였다.

시공이음부의 투과계수는 콘크리트 블록보다 약  $10^1 \sim 10^4$  배 정도까지 투과성이 큰 것으로 파악되어, 현장 타설과정에서 시공이음부의 품질관리가 저장시설의 기밀성능 확보 차원에서 매우 중요함을 확인하였다.

또한, 접합면에 아크릴계 접착제를 타설함으로써 시공이음부의 투과계수를 콘크리트 블록 수준까지 감소시켜 기밀성능을 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

콘크리트 블록의 초기 수분함량이 높을수록 가스투과 계수가 감소하여 기밀성능이 향상되므로 운영중 콘크리트 라이닝의 포화도 확보가 압축공기 지하저장공동 기밀성능의 장기적 유지관리에 중요하다고 할 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다. 콘크리트 블록 시료제작에 도움을 주신 티엠이엔씨 장정환 박사와 (주)흥일 김홍래 사장님께 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 김형목, 류동우, 신중호, 2008, 굴착영향영역 투수특성의 실험적 평가기술, 터널과 지하공간, 18(2), pp. 91-97.
2. 김형목, 류동우, 정소결, 송원경, 2009, 일본의 압축공기 지하저장 기술, 2009년 한국암반공학회 춘계학술발표회논문집, pp. 9-19.
3. 박주남, 여인호, 2009, 초고속 진공튜브 시스템의 기밀성 연구, 2009년 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 967-972.
4. 소형석, 소양섭, 2000, 콘크리트의 투기성과 압축강도 사이

- 의 관련성, 대한건축학회 논문집-구조계, 16(11), pp.107-112
5. Abbas, A., Carcasses, M., Ollivier, J.P., 1999, Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation, Materials and Structures, Vol. 32, pp. 3-8.
6. Horne, R.N., Modern well test analysis, Petroway, Inc., 1995.
7. Jones, S.C., 1972, A rapid accurate unsteady-state Klinkenberg parameter, SPE journal, pp. 383-397.
8. Neville, A., 1996, Properties of concrete, 4th ed., Wiley, pp. 490-497.
9. Mehta, P., Monteiro, P., 2005, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 3 ed., McGraw-Hill Professional, pp. 125-130.
10. Sanjuan, M. A., Munoz-Martialay, R., 1996, Influence of the water/cement ratio on the air permeability of concrete, Journal of Materials Science, 31, pp. 2829-2832.
11. Tanikawa, W., Shimamoto, T., 2006, Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3, pp. 1315-1338.
12. Tezuka, M., Matsui, I., Henmi, Y., Moriya, A., 2007, Proposal for water-proof testing method of placing joint and cracking parts of concrete under high pressure, AIJ J. Technol. Des. Vol. 13, No. 26, pp. 411-414.
13. 氏家勲, 菊地一義, 佐藤良一, 長龍重義, 1995, 新旧コンクリートの打継目の透気性状に影響を及ぼす要因に関する研究, 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 747-752.

**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

**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

**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