

현장 투기시험과 수리시험을 이용한 불포화 단열암반 수리지질 특성화 연구

전성천^{1,‡} · 방성현¹ · 이창영¹ · 이명재¹ · 이정환²

¹(주)지오그린21

²한국원자력환경공단

요 약

근래 대규모 지하공간 이용시설의 건설에 따른 지하수 유출은 국지적으로 수십 m의 불포화대 암반을 형성시키고 있어 이에 적합한 수리지질특성 조사방법의 정립이 요구되고 있다. 현재 국내 불포화 암반의 수리지질 조사는 수압시험이 주로 이용되고 있으나, 불포화대는 대부분 공기로 채워져 있으므로 투기시험이 자연적인 단열조건에서 수리지질특성을 조사하는데 유용하게 이용될 수 있다. 이에 불포화 단열암반에 시추공을 굴착하여 구간별 투기시험을 실시하였으며, 수압시험을 병행하여 투기시험 결과의 적절성을 비교·검토하였다. 투기시험과 수압시험 결과의 비교에 의하면, 투기시험으로 평가된 투과도가 수 $\times 10^{-13}$ m² 수준으로 상대적으로 높은 구간에서는 투기시험 결과가 수압시험보다 2~4배 크게 나타났으며, 투과도가 수 $\times 10^{-15}$ m²으로 낮은 구간에서는 수압시험으로 평가된 값이 오히려 투기시험보다 2~10배 가량 크게 나타났다. 이는 투과성이 높은 불포화 암반에서의 수압시험이 해석가정조건인 완전한 포화상태의 지하수 흐름을 만족시키지 못하고, 투과성이 낮은 구간에서는 미세단열의 모세관압에 의해 투기시험시 기체의 흐름이 제한되기 때문으로 추정된다. 따라서 유체가 빠르게 이동하는 투수성 단열구간에서 투기시험이 투과도를 조사하는데 효과적으로 활용될 수 있으며, 단열의 발달이 미약한 저투수성 구간에서는 수압시험이 더 적합할 수 있다. 그러나 단열암반의 투과도는 심도에 따라 크게 변하여 개별 현장시험 방법은 불포화 암반의 투과도 분포를 조사하는데 한계를 가질 수밖에 없으므로 현장 투기시험과 수리시험 병행되어 상호보완되어야 할 것으로 판단된다.

주요어: 불포화 암반, 수리지질, 투기시험, 수리시험, 투과도

Seong-Chun Jun, Sung-Hyun Bang, Chang-Young Lee, Myeong-Jae Yi and Jeong-Hwan Lee, 2017, Hydrogeological characterization using pneumatic test and hydraulic test methods in unsaturated fractured rock. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 53, no. 3, p. 447-465

ABSTRACT: Recently, the groundwater drainage by large-scale underground facilities forms unsaturated fractured rock of several tens of meters locally. It is necessary to establish the hydrogeological characterization method for unsaturated fractured rock. As unsaturated fracture rock is mostly filled with air, a pneumatic test can be a useful method to investigate the hydrogeological characteristics under natural fracture condition. In this study, pneumatic tests had been performed in unsaturated fractured rock, and the suitability of pneumatic test was examined with comparison to a hydraulic test. Results of pneumatic tests showed a wide range of permeability changes depending on fracture characteristics. According to the comparison between the results of pneumatic and hydraulic test, the permeability values by pneumatic tests were 2~4 times larger than those by hydraulic test in the sections where permeability values are larger than 10^{-13} m². But, hydraulic test results were 2~10 times larger in the sections with the permeability of lower than 10^{-14} m². This is because hydraulic tests in highly permeable unsaturated fractured rock did not satisfy the saturated groundwater flow condition. In case of pneumatic tests in the low permeability section, the injected gas could not enter into the aperture filled with pore water by capillarity. As field test methods to investigate the hydrogeological properties of unsaturated fractured rock, it is confirmed that a pneumatic test is suitable for the permeable sections, and a hydraulic test is suitable for the sections with low permeability. However, because the permeability of fractured rock varies greatly depending on the depth of field, a single field test method has limitations in investigating the permeability distribution of unsaturated fractured

[‡] Corresponding author: +82-2-6330-2541, E-mail: sc-jun@daum.net

rock. Therefore, it is considered that both pneumatic test and hydraulic test should be complemented for effective investigation.

Key words: unsaturated fractured rock, hydrogeology, pneumatic test, hydraulic test, permeability

(Seong-Chun Jun, Sung-Hyun Bang, Chang-Young Lee and Myeong-Jae Yi, GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376 Republic of Korea; Jeong-Hwan Lee, Korea Radioactive Waste Agency, Dajeon 34129 Republic of Korea)

1. 서 론

지하 매질은 지하수면을 기준으로 하부의 지하수로 가득 차있는 포화대와 상부의 일부 공극수 외에 공기로 채워져 있는 불포화대로 구분된다. 해외 건조지역의 경우에는 지하수면이 깊어 불포화 암반이 수십 ~ 수백 m로 두껍게 발달할 수 있으나, 국내는 몬순기후로 자연적인 조건에서는 대개 수 m의 불포화대가 나타나며, 이들은 대부분 층적층이나 풍화대에 해당한다. 그러나 국내에도 석유가스 지하저장시설, 원자력발전소, 방폐물 처분장 등의 대규모 지하공간 활용시설이 건설되고 운영됨에 따라 다량의 지하수가 장기간 유출되어 국지적으로 수십 m 이상의 불포화 암반구간이 형성되고 있는 것으로 알려지고 있다(Cho *et al.*, 2004; Ji *et al.*, 2012; Ha *et al.*, 2016). 따라서 국내에서도 불포화 암반의 수리지질특성에 대한 조사 필요성이 대두되고 있으며, 특화된 현장조사 및 해석방법의 정립이 요구되고 있다.

포화대(대수층) 암반에서 수리지질특성(투수성)을 조사하는 대표적인 방법으로는 양수시험, 순간수위변화시험, 수압시험 등이 있으며, 해석방법도 이론적으로 잘 정립되어 있다(Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996; Singhal and Gupta, 1999). 그런데 불포화대는 지하수로 포화되어 있지 않으므로 포화대의 양수시험, 순간수위변화시험 등 수리시험은 방법론적으로 수행이 불가능하다. 수압시험의 경우에는 물을 가압하여 주입하는 시험방법이므로 불포화대에도 적용가능하나, 시험 및 해석방법이 포화대 조건을 대상으로 정립된 것이므로 적용시 해석조건에 대한 주의가 필요하다. 한편 대기압으로 존재하는 불포화 암반에 다량의 물을 가압하여 주입하면 암반단열의 상태를 변형시켜 시험결과로 도출되는 투과도(permeability)에 왜곡이 발생할 수 있으며, 투과도가 높은 단열대의 경우에는 물 주입에 의해 압력을 형성시키기 어려우므로

시험의 수행이 어려울 수 있다.

투기시험(pneumatic test)은 지중 불포화대에 기체를 주입하거나 추출하여 매질의 투과도를 정량적으로 평가하는 현장 시험방법으로 공기추출시험(air extraction test), 공기주입시험(air injection test) 등이 있다. 천부 불포화대 토양의 경우에는 휘발성 유류오염의 정화방법인 토양증기추출법(SVE)의 설계 등과 관련하여 공기추출시험을 수행하는 경우가 많으며(Suthersan, 1997), 국내에서도 의왕, 원주 등에서 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2000; Lee and Yeo, 2013). 불포화 암반의 경우에는 토양층과 비교하여 투과도가 작기 때문에 기체추출시에 압력 감소에 의한 밀도의 감소로 일정한 질량유량의 추출이 어려우므로 공기주입시험(air injection test)을 실시하는 것이 일반적이다. 불포화 암반에서 공기주입에 의한 투기시험은 1990년대 미국의 옹회암 지역에서 활발하게 수행되었으며(LeCain, 1995, 1997; Guzman *et al.*, 1996; Illman, 1999), 이후 형태곡선 및 수치해석을 이용한 시험결과 해석과 관련된 다수 연구결과가 보고된 바 있다(Illman and Neuman, 2000; Vesselinov and Neuman, 2001; Hyun *et al.*, 2002; Illman, 2005).

앞서 언급하였듯이 최근까지 우리나라에서는 불포화 암반의 수리지질특성에 대한 조사 및 연구 필요성이 적었기 때문에 사례가 빈약하고, 단열암반에서 투기시험을 실시한 연구사례는 보고된 바 없다. 따라서 금번 연구에서는 국내의 불포화대가 깊게 발달한 단열암반에 시추공을 굴착하고, 효과적인 투기시험을 수행하기 위한 장치를 제작하여 불포화 암반의 구간별 투기시험을 수행하였다. 한편 투기시험 결과의 적정성과 한계를 검토하기 위하여 수리시험인 구간별 수압시험을 병행하여 해석결과를 비교·검토하였다. 마지막으로 투기시험과 수압시험을 병행하여 불포화 암반의 수리지질 특성을 조사하는 방법을 제안하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 경북 경주 동해안에 인접한 산지로 대규모 지하공간 활용시설에 의하여 지하수면이 지표하 수십 m까지 하강한 지역이다. 조사지점의 지질은 백악기 퇴적암류이며, 인접하여 화강섬록암이 분포한다. 퇴적암류는 주로 이암과 실트스톤, 사암의 호층으로 구성되며, 대부분 규화되거나 변질된 것으로 알려져 있다(KHNP, 2007). 연구지역 내 불포화 암반 구간의 수리지질특성조사를 위하여 능선 경사부에 인접한 2개 시추공(HTB-1, HTB-2)을 지하수면 부근까지 굴착하였다(그림 1). 시추결과에 의하면 퇴적 변성암인 호온헬스가 기반암을 구성하고, 열수변질대가 불규칙하게 혼재하였으며, 다수의 파쇄대 및 암

반단열이 발달하고 있다. 조사지점에서 지하수면은 지표하 94.3 ~ 94.6 m 심도에 위치하는데, 상부 토양층 두께가 1.7 ~ 2.4 m이고, 풍화암의 두께가 5.8 ~ 9.6 m이므로 불포화 단열암반은 82.4 ~ 86.8 m 두께로 분포하고 있다(표 1).

2.2 이론적 배경

2.2.1 투기시험

투기시험은 지중에 기체를 주입하거나 추출하여 매질의 투과도를 정량적으로 평가하는 현장시험 방법이다. 투기시험의 기본적인 원리는 대수층(포화대)에서 일반적으로 수행하는 지하수 양수시험(또는 주입시험)과 동일한데, 양수시험은 지하수를 일정한 유량으로 양수하면서 지하수위 변화를 측정하여 수리전도도를 해석하는 시험인 반면, 투기시험은 지하수

Table 1. Details of pneumatic test condition by each test section.

Division	Unsaturated zone			Etc. (depth of groundwater table; m)
	Soil	Weathered rock	Fractured rock	
HTB-1	Interval (bgs*, m)	0 ~ 2.4	2.4 ~ 12.0	12.0 ~ 94.4
	Length (m)	2.4	9.6	82.4
HTB-2	Interval (bgs, m)	0 ~ 1.7	1.7 ~ 7.5	7.5 ~ 94.3
	Length (m)	1.7	5.8	86.8

*bgs is the abbreviation of below ground surface

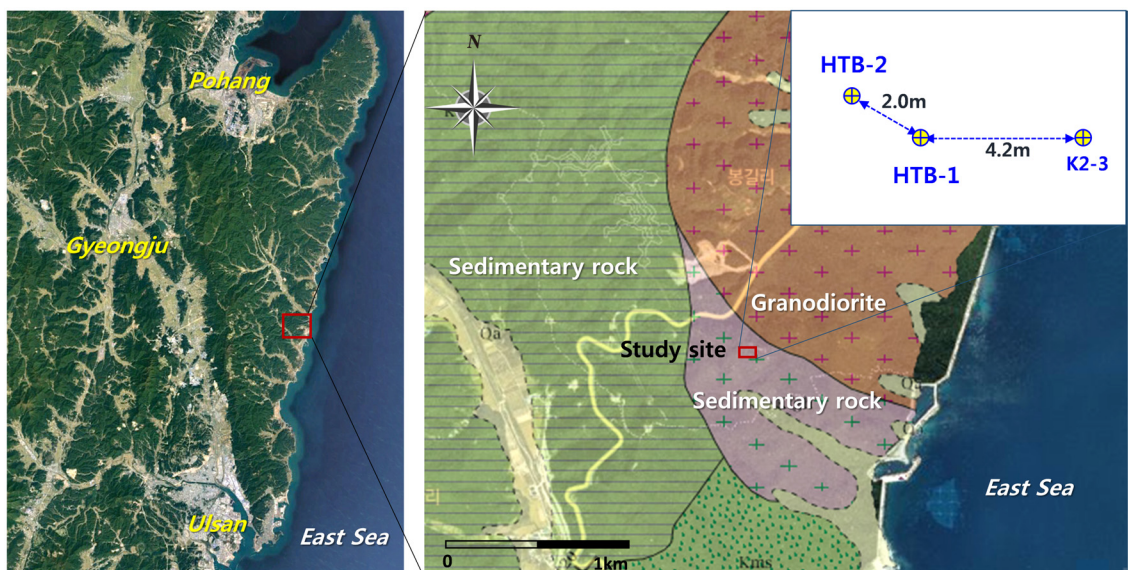


Fig. 1. Location of study site and borehole arrangement (Sources: Google Earth and MGEO of KIGAM).

양수량 대신에 기체 질량유량, 지하수위 변화 대신에 압력 변화를 시험에 이용한다. 투기시험 결과해석 또한 양수시험과 동일하게 시험구간 압력변화 측정자료를 이용하며, 정류상태(steady state) 및 부정류상태(transient state)로 해석할 수 있다.

정류상태의 해석방법은 시험구간에 일정한 질량 유량으로 기체를 주입하여 압력이 더 이상 상승하지 않고 안정화된 상태에 도달하였을 경우에 이용하는 해석방법이다. 암반의 투과도(permeability)는 투기시험 시작전과 종료시의 시험구간의 압력증가량과 기체유량을 이용하여 평가하게 된다. 정류상태 해석식은 단일공을 이용한 지하수 수리시험(주입시험)의 Hvorslev (1951) 해석해 중에서 정류상태 타원형 흐름의 해석해를 밀도가 변하는 유체(기체)로 변형하여 활용한다. Hvorslev (1951)의 정류상태 타원형 흐름의 해석해는 아래의 (식 1)과 같다.

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w} \right)^2} \right)}{2\pi \Delta H L} \quad (1)$$

여기서 K 는 수리전도도(hydraulic conductivity), Q 는 유량, L 은 시험구간 길이, r_w 는 시험관정 반지름, ΔH 는 지하수위 변화량이다. 지하수위 변화량 ΔH 와 수리전도도 K 는 유체의 밀도와 점성도를 고려하여 아래와 같이 재정의될 수 있다.

$$\Delta H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \quad (2)$$

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (3)$$

여기서 P_2 는 최종압력, P_1 은 초기압력, ρ 는 유체 밀도, g 는 중력가속도, k 는 고유 투과도(intrinsic permeability), μ 는 유체 동점성계수이다.

위의 (식 1)은 (식 2)와 (식 3)을 이용하여 밀도가 변하는 유체의 해석식으로 변형가능하다. 이상기체 상태방정식을 일정한 질량유량의 투기시험에 적용하고, 온도 보정까지 포함하면, 아래 (식 4)와 같이 정리될 수 있다(LeCain, 1997).

$$k = \frac{P_{sc} Q_{sc} \mu \ln \left(\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w} \right)^2} \right) T_f}{\pi L (P_2^2 - P_1^2) T_{sc}} \quad (4)$$

여기서 P_{sc} 는 표준상태(standard state) 압력, Q_{sc} 는 표준상태에서 유량, T_{sc} 는 표준상태 절대온도, T_f 는 시험구간 절대온도이며, 다른 기호는 위와 동일하다.

부정류상태의 해석방법은 기체주입시 시험구간에서 시간에 따른 압력변화를 측정하여 암반의 투과도(permeability)을 평가하는 방법이다. 부정류 상태 해석방법은 지하수 양수시험과 유사하게 형태곡선(type curve)법 또는 반대수(semi-log) 직선법을 이용할 수 있다. 투기시험과 관련하여 이용될 수 있는 형태곡선법은 지하수 양수시험의 누수대수층(leaky aquifer)의 조건에서의 Hantush and Jacob (1955)의 형태곡선 해석식을 변형시킨 해석식이다. Semi-log 직선법은 지하수 양수시험의 Cooper and Jacob (1946)의 해석식을 밀도가 변하는 유체(기체)로 변형하여 활용할 수 있다. 본 연구에서는 해석식을 압축성 유체에 적용할 때 전개과정이 잘 알려진 Cooper and Jacob (1946)의 직선법에 기초한 해석식을 이용하였다.

Cooper and Jacob (1946)의 직선법의 해석해는 아래의 (식 5)과 같다.

$$\Delta H = \frac{2.3Q}{4\pi LK} \left(\log \left(\frac{2.25LK}{r_w^2 S} \right) + \log(t) \right) \quad (5)$$

여기서 S 는 저류계수, t 는 누적시험시간이며, 다른 기호는 위와 동일하다.

Cooper and Jacob (1946)의 직선법은 시간에 따른 지하수위 변화량을 시간이 로그인 반대수(semi-log) 그림을 도시하고 로그 단위당 수위변화량을 구하여 수리전도도를 계산한다. 위의 (식 5)를 (식 2)와 (식 3)을 이용하여 밀도가 변하는 유체(기체)의 해석식으로 변형하면, 아래의 (식 6)과 같다(Suthersan, 1997).

$$\Delta P = \frac{2.3\mu Q}{4\pi Lk} \left(\log \left(\frac{2.25kP_{sc}}{r_w^2 \epsilon \mu} \right) + \log(t) \right) \quad (6)$$

여기서 ϵ 는 공극 내 기체비율로 정확한 값을 구하기 어려운데, 투과도(k)는 값은 양수시험과 마찬가지로 로그단위당 압력변화량(A)을 이용하여 계산할 수 있다. 로그단위당 압력변화량 $A = (2.3\mu Q)/(4\pi Lk)$ 이므로, 투과도 $k = (2.3\mu Q)/(4\pi LA)$ 로 간단하게 계산될 수 있다.

한편 LeCain (1995)은 Cooper and Jacob (1946)을

압축성 유체로 수정한 식(Energy Resource Conservation Board, 1975)을 이용하여 투기시험 해석에 이용할 수 있는 아래와 같은 semi-log 직선식을 제시하였다(식 7).

$$(P^2 - P_i^2) = \frac{2.3P_{sc}TQ_{sc}\mu}{2\pi T_{sc}Lk} \left(\log\left(\frac{ktP}{\phi\mu r_w^2}\right) + \log(t) + 0.352 \right) \quad (7)$$

시간에 따른 압력제곱 변화량을 시간이 로그인 반대수(semi-log) 그림을 도시하고 로그 단위당 압력제곱 변화량(m)을 구하여 투과도를 계산하게 된다. 압력제곱 변화량은 (식 7)의 계수이므로 투과도는 아래의 (식 8)과 같이 계산할 수 있다.

$$k = \frac{0.366P_{sc}TQ_{sc}\mu}{T_{sc}Lm} \quad (8)$$

투기시험을 이용하여 평가된 불포화 암반의 투과도(permeability)는 공극의 상대 포화도(relative saturation)가 고려된 유효 투과도(effective permeability)이다. 유효투과도는 암반의 고유 투과도(intrinsic permeability)보다는 작은 값이지만, 일반적으로 단열암반에서 유체의 흐름을 결정하는 큰 단열의 경우에는 불포화 암반에서 대부분 공기로 채워져 있고, 현장시험은 일부 오차 및 불확실성을 피할 수 없으므로, 유효투과도를 고유 투과도로 간주하였다.

2.2.2 수압시험

수압시험은 시추공 내의 일정구간을 패커로 밀폐한 후 일정압력의 물을 주입하여 주입압력과 주입량과의 관계로부터 대상 매질의 투수성을 평가하는 현장시험 방법이다. 수압시험은 단계별로 주입시험을 정류상태로 해석하여 수리전도도(또는 투수계수)를 계산하고, 수리지질특성에 따른 유효주입압력(P)-주입량(Q)의 패턴을 결정하여 루전값 또는 수리전도도를 최종적으로 결정하게 된다.

수압시험의 단계별 해석은 대수층 양수시험의 정류상태 해석식인 Thiem (1906) 해석식에 기초하고 있다. 피압대수층에서 정류상태의 수리전도도(K)는 아래와 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$K = \frac{Q}{2\pi L(h_{r_2} - h_{r_1})} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (9)$$

여기서 Q 는 양수량(또는 주입량), L 는 시험구간, h_{r_1} 과 h_{r_2} 는 거리가 r_1 과 r_2 인 관측공의 수두이다.

저투수층에서 정압주입시험을 수행하는 경우에 일정한 시간이 지난 후에는 주입량이 거의 변하지 않으므로 정류상태를 가정하여 위의 (식 9)를 다음과 같이 변형하여 이용할 수 있다.

$$K = \frac{Q}{2\pi LH} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) = \frac{2.3Q}{2\pi LH} \log\left(\frac{R}{r_w}\right) \quad (10)$$

$(L \geq 10r)$

여기서 R 은 시험공의 영향반경(수위변화가 없는 거리), H 는 유효주입압력(P_i)을 수두로 환산한 총수두(total head), r_w 는 시험공의 반경이다. 수압시험에서 영향반경 R 을 정확하게 아는 것이 불가능한데, (식 10)에서 로그로 포함되므로 R 의 변화 크기에 비해 수리전도도에 미치는 영향은 상대적으로 작다. 통상적으로 R 은 5 ~ 10 m의 값이 합리적인 것으로 알려져 있다(Royle and Sc, 2002). 일반적으로 수압시험 구간의 길이는 5 ~ 10 m로 설정하므로, 국내에서는 $R=L$ 로 간주하여 수리전도도를 계산하는 경우가 많다.

총수두 산정을 위한 정압주입시험의 유효주입압력은 다음과 같이 구한다.

$$P_i = P_g + \gamma_w(h_g + h_s - h_f)/10 \quad (11)$$

여기서 P_i 는 유효주입압력, P_g 는 압력계 계측압력, h_g 은 지표부터 압력계까지 높이, h_s 는 지표에서 지하수위까지 심도, h_f 은 관내 저항에 의한 손실수두, γ_w 는 물의 단위 중량이다. 루전(lugeon)값은 유효주입압력이 10 kg/cm²일 때를 기준으로 하나 규정압력 이외의 압력에서는 아래의 식으로 환산하여 구한다.

$$Lu = \frac{10Q}{P_i L} = \frac{10Q_0}{P_i} \quad (12)$$

여기서 Q_0 는 단위 길이에 대한 주입량이다. 암반을 균질등방성으로 가정하여 Darcy의 법칙을 적용하면 루전값(Lu)을 수리전도도로 환산할 수도 있다.

여러 단계로 수행되는 수압시험의 결과는 주입압력-주입량 곡선(P-Q곡선)을 이용하여 최종적으로 해

석하게 되는데, 곡선의 형태에 따라 주입압력 10 kg/cm^2 와 만나는 점의 주입량을 환산하여 루전값으로 계산한다. Houslyb (1976)는 각각의 유효주입압력에 대한 루전값 형태를 5개(laminar, turbulent, dilation, wash-out, void filling)의 흐름형태(flow pattern) 그룹으로 분류하여 대푯값을 결정하는 방법을 제시하였다.

2.3 연구방법

연구지역에서의 현장조사는 2016년 4월 중순에서 5월말까지 진행되었는데, 시험공 굴착을 위한 시추조사, 단열상태 파악을 위한 공내영상촬영, 불포화 암반 투기시험 및 수압시험이 함께 수행되었다. 일반적으로 현장시험은 시추조사가 완료된 후에 나공상태의 암반 시추공에서 순차적으로 수행되어야 하지만, 연구지역의 암반은 많은 구간에 단열 및 파쇄대가 발달하여 시추공을 나공 상태로 유지하여 현장시험을 수행하기 어려웠다. 이에 일정구간 시추를 진행한 후 현장시험(투기시험, 수압시험)을 실시하고, 해당구간을 그라우팅을 통하여 보강하고 추가 굴진과 현장시험을 반복하는 방식으로 수행하였다.

불포화 암반 투기시험은 나공 상태의 시추공에서 실시되므로 시험을 정확하고 효과적으로 수행하기 위한 별도의 투기시험 장치를 제작하여 수행하였다. 시험장치는 시추공에서 투기시험 구간을 구분하여 밀폐하고, 기체를 일정한 질량유량으로 연속적으로 주입하며, 시험구간에서 압력변화를 실시간으로 측정하여 기록하는 기능을 갖추도록 제작하였다(그림 2). 개별 시험구간에서 투기시험은 ① 암반상태를 고려한 패커 위치 결정, ② 시험구간 패커 및 압력센서 설치, ③ 기체 주입조절 및 모니터링 모듈 설치, ④ 시험구간 내 일정한 질량유량의 기체주입, ⑤ 시험구간 압력 변화 모니터링의 순서로 실시되었다. 매 구간의 투기시험은 시추 중에 이용된 용수가 완전하게 배수되어 암반단열이 자연상태에 가깝게 회복된 후 실시하였다. 투기시험에 사용한 주입기체는 공기 대신에 비반응성인 질소가스를 이용하였으며, 해석시 질소의 동점성계수($1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ at 20°C)를 고려하였다. 질소 주입유량은 자연상태의 불포화 암반의 조건을 가능한 유지하기 위하여 시험구간의 압력상승이 $0.1 \sim 0.5 \text{ bar}$ ($10 \sim 50 \text{ kPa}$) 수준이 되도록 조정하

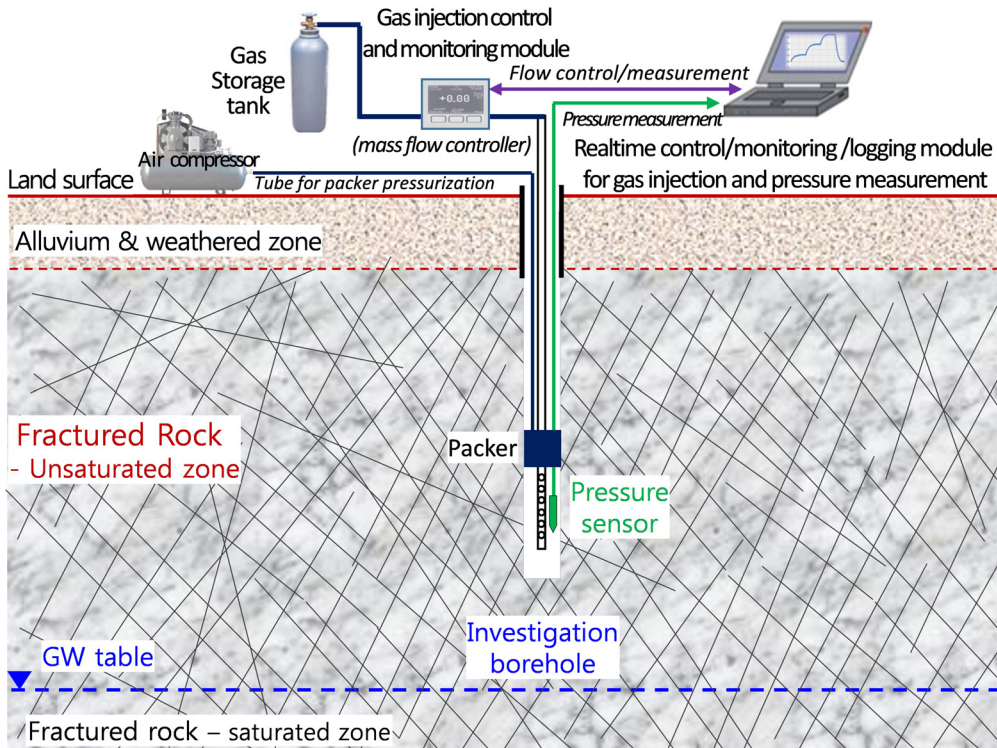


Fig. 2. Schematic diagram of pneumatic test in unsaturated fracture rock.

Table 2. Details of pneumatic test condition by each test section.

Borehole	Test section (bgs, m)	Initial pressure at test section before pneumatic test (kPa)	Injection rate (L/min, standard state)	Etc.
HTB-1	31.0 ~ 45.8	99.9	5-10-15, 10-20-30	2 times
	48.5 ~ 61.6	100.7	30-60-90	
	59.5 ~ 62.5	100.3	5	excessive pressure rise, interruption
	70.7 ~ 77.1	100.9	5-10-15	
	81.5 ~ 89.8	101.0	5-10-15	
	89.8 ~ 94.4	101.2	15-30-60-90	
HTB-2	51.0 ~ 58.6	101.6	5-10-15	
	59.8 ~ 69.7	101.1	30-60-90	
	69.5 ~ 75.3	100.9	30-60-90	
	75.8 ~ 94.3	101.2	15-30-45	

Table 3. Details of hydraulic test condition by each test section.

Borehole	Test section (bgs, m)	Injection pressure (kgf/cm ²)	Etc.
HTB-1	32.0 ~ 45.8	3	constant pressure injection
	45.5 ~ 52.6	6	constant pressure injection
	49.5 ~ 61.6	1, 3, 5, 7, 10	lugeon test (5 stages)
	70.0 ~ 80.2	1, 3, 5, 7, 10	lugeon test (5 stages)
	81.5 ~ 91.1	0.5, 1.5, 3, 5, 7	lugeon test (5 stages)
	89.5 ~ 97.0	1, 3, 5, 7, 10	lugeon test (5 stages)
HTB-2	40.5 ~ 51.0	1, 3, 5, 7, 8	lugeon test (5 stages)
	51.0 ~ 62.0	1, 3, 5	lugeon test (3 stages)
	61.5 ~ 73.0	1, 3, 4	lugeon test (3 stages)
	73.0 ~ 84.0	1, 3, 5	lugeon test (3 stages)
	83.5 ~ 95.0	1, 3, 5	lugeon test (3 stages)

여 수행하였다. 대부분 시험구간에서 주입 시작후 10 분 내에 압력이 준정류상태에 도달하였으며, 지속적인 압력 상승시 주입유량을 축소하여 재시험하였다. 한편 투기시험시 주입유량 증가에 따른 시험구간 내의 비선형 유동에 의한 압력 손실 또는 외부로 누출 등 확인할 수 있기 위하여, 개별 시험구간에 대하여 단계당 10분씩 3단계 주입을 연속적으로 수행하는 것을 기본 방식으로 시험을 수행하였으나, 시험구간 내의 압력 변화를 고려하여 시험시간을 증대시키기도 하였다. HTB-1 및 HTB-2 시추공에서 수행한 구간별 투기시험 내역 및 시험조건은 표 2와 같다. 시

험구간은 암질의 상태 및 시험 여건에 따라 3 ~ 18.5 m로 설정하였으며, 1단계 주입유량은 5 ~ 30 L/min (표준상태)로 시험을 수행하였다.

투기시험 결과의 비교검토를 위한 수압시험은 개별구간의 투기시험을 완료한 후에 실시되었는데, 투기시험과 별도의 패커시스템을 이용하였으므로 시험구간에는 일부 차이가 존재한다. 수압시험은 현장 여건에 따라 3단계 또는 5단계로 수행되었으며, 일부 구간에서는 1단계의 정압주입시험을 수행하였다. HTB-1 및 HTB-2 시추공에서 수행한 구간별 수압시험 내역 및 시험조건은 표 3과 같다.

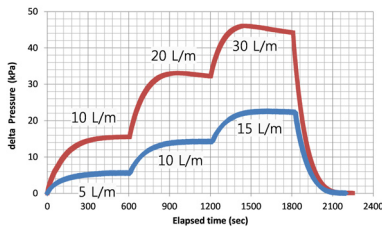
3. 투기시험 결과 및 해석

3.1 기체주입에 따른 압력변화

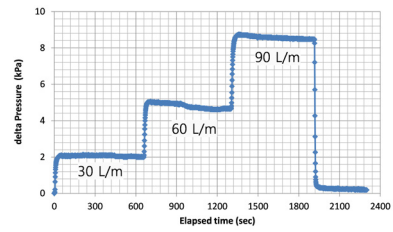
그림 3은 단계별로 수행된 투기시험의 시험구간 내 연속적인 압력변화 측정결과이다. 시험구간 내

질소가스 주입에 따라 압력구간은 빠르게 상승하여 대부분 10분 이내에 안정화되었는데, 단계별 압력은 주입유량에 비례하여 상승한 후에 안정화 되었다. 압력 상승량은 수 ~ 수십 kPa 범위로 나타났다.

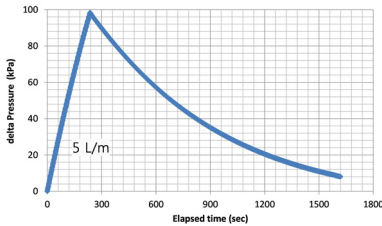
주입시험시 상당수 구간에서는 압력이 상승하였



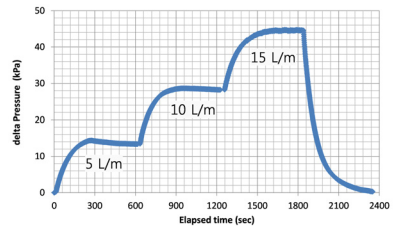
(a) HTB-1, 31.0~45.8 m (bgs)



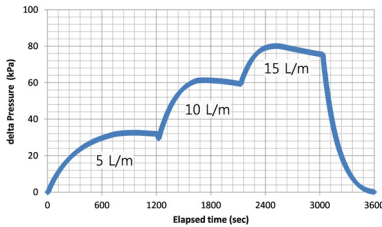
(b) HTB-1, 48.5~61.6 m (bgs)



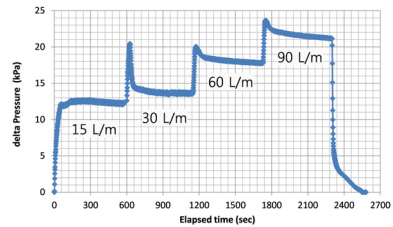
(c) HTB-1, 59.5~62.5 m (bgs)



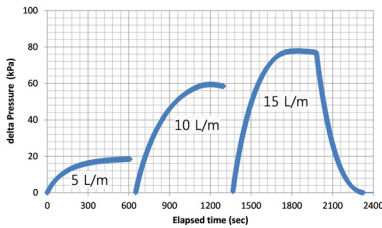
(d) HTB-1, 70.7~77.1 m (bgs)



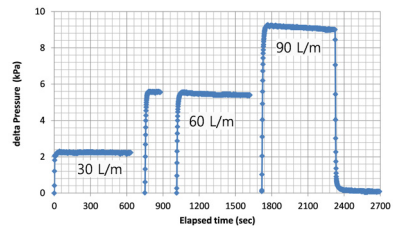
(e) HTB-1, 81.5~89.8 m (bgs)



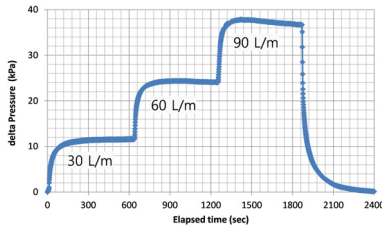
(f) HTB-1, 89.8~94.4 m (bgs)



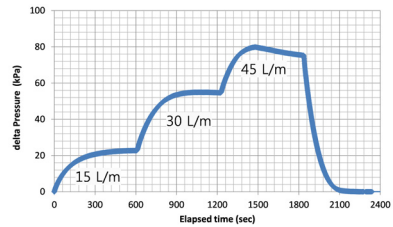
(g) HTB-2, 51.0~58.6 m (bgs)



(h) HTB-2, 59.8~69.7 m (bgs)



(i) HTB-2, 69.5~75.3 m (bgs)



(j) HTB-2, 75.8~94.3 m (bgs)

Fig. 3. Pressure variations during pneumatic test at each test section “bgs” is the abbreviation of “below ground surface”.

다가 일부 감소하면서 안정화되는 경향을 나타내었는데, 이는 질소가스 주입에 따른 압력상승으로 단열을 채우고 있는 일부 물을 밀어내면서 기체의 유동채널이 추가로 형성되기 때문으로 추정된다(LeCain, 1997). 특히 HTB-1 시추공의 지하수면 근처인 심도 89.8 ~ 94.4 m 구간의 시험결과에서는 급격한 압력 상승후 하강으로 나타났는데(그림 3f), 시험초기 지하수면 직상부 구간으로 모세관압에 의해 물로 채워져 있는 단열이 많았기 때문으로 추정된다.

HTB-1 시추공의 심도 59.5 ~ 62.5 m 구간에서는 작은 주입유량에도 급격하고 지속적인 압력 상승을 나타내어 1단계에서 주입을 중단하였는데, 시험구간이 좁고 투과도가 매우 낮기 때문이다(그림 3c). HTB-2 시추공의 심도 51.0 ~ 58.6 m 및 59.8 ~ 69.7 m 구간의 압력 상승 패턴은 다른 구간과 다른 형태를 나타내는데, 이는 주입유량을 증대시키는 과정에서 가압상태를 유지하지 않고, 시험 중단후 주입유량을 재설정하는 방식으로 시험이 이루어졌기 때문이다(그림 3g, 3h).

3.2 투기시험 결과 정류상태 해석

투기시험 결과의 정류상태 해석은 주입전 초기 압력과 단계별 안정압력을 이용하여 암반의 투과도(permeability)를 평가하는 것이다. 정류상태 해석에는 앞의 2.2절의 (식 4)를 이용하였다(LeCain, 1997). 표 4에 각 시험구간의 주입유량에 따른 투과도 평가값을 정리하였다. 투과도의 최소값은 HTB-1 시추공의 심도 81.5 ~ 89.8 m 구간에서 $4.02 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 로 나타났으며, 최대값은 HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간에서 $3.54 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 로 최소값에 비해 90 배 가량 큰 것으로 나타났다.

동일한 시험구간에서 여러 단계로 수행하여 계산된 투과도는 주입유량이 증가함에 따라 감소하거나(ex. HTB-1 심도 31.0 ~ 45.8 m 구간), 증가하는(ex. HTB-1 심도 81.5 ~ 89.8 m 구간) 경향을 나타내기도 하였다. 주입유량 증가에 따라 투과도가 감소하는 것은 비선형 흐름에 의한 압력수두 손실과 관련될 수 있으며, 투과도가 증가하는 것은 패커로 밀폐된 구간에서 압력상승으로 인한 기체 누출(leakage)과 관련될 수 있다.

그림 4는 시험구간 투과도의 대푯값을 구하기 위하여 주입유량 변화에 따른 압력제곱 변화량을 나타

낸 것이다. (식 4)에 의하면, 투과도는 주입유량과 압력제곱차의 비율($Q_{sc}/(P_2^2 - P_1^2)$)에 비례하므로 동일한 구간에서 여러 단계로 시험된 결과를 이용하여 기울기를 계산하면, 투과도의 대푯값을 계산할 수 있다. 단 현장시험에는 많은 불확실성이 포함될 수 있으므로, 주입유량 증가에 의한 투과도의 감소 및 증가 영향은 무시하였다. 시험구간별 대푯값은 표 4에 함께 정리하였다.

투기시험 구간별로 보면, 투과도가 상대적으로 크게 나타난 구간은 HTB-1 시추공의 심도 48.5 ~ 61.6 m 및 89.8 ~ 94.4 m 구간과 HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간이다. 이 구간은 시추 중에 작업 용수의 전량 또는 부분 누수가 발생한 구간이다.

3.3 투기시험 결과 부정류상태 해석

투기시험시 시간에 따른 압력변화 자료를 이용하여 부정류상태로 암반의 투과도를 평가하였다. 부정류상태 해석은 Cooper and Jacob (1946)의 직선법에 기초한 (식 6) 및 (식 7)의 로그단위 시간당 압력 증가량 및 압력제곱 증가량을 이용하여 평가하였다(LeCain, 1995; Suthersan, 1997).

그림 5는 Suthersan (1997)의 해석식을 이용하기 위하여 반대수(semi-log) 그래프를 도시하여 로그단위 시간당 압력증가량을 계산한 사례이며, 그림 6은 LeCain (1995)의 해석식을 이용하기 위해 semi-log 그래프를 도시하여 로그단위 시간당 압력제곱 증가량을 계산한 사례이다. 표 5에 전체 시험구간의 주입량에 따른 투과도를 정리하였으며, 지하수 유동에 관련된 수리전도도로 환산하여 제시하였다. HTB-2 시추공의 심도 51.0 ~ 58.6 m 및 59.8 ~ 69.7 m 구간은 단계시험이라기 보다는 연속적인 개별 유량 시험이므로, 모든 단계의 시험결과를 해석하였다.

Suthersan (1997)의 해석식으로 평가된 투과도의 최소값은 HTB-1 시추공의 심도 59.5 ~ 62.5 m 구간에서 $9.12 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 로 나타났으며, 최대값은 HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간에서 $2.94 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 로 나타났는데 최소값의 약 320배이다. LeCain (1995)의 해석식으로 평가된 투과도의 최소값과 최대값도 동일한 구간에서 나타났으나, 최소값은 $5.76 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 최대값은 $2.79 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 로 상대적으로 작게 나타났다.

전체 투기시험 자료에 대하여 Suthersan (1997) 해석식으로 평가된 투과도(또는 수리전도도)는 LeCain

Table 4. Steady-state analysis results of pneumatic test.

Borehole	Test section (bgs, m)	Injection rate (L/min)	Pressure increase (kPa)	Permeability (k, m ²)	
				individual steps	representative
HTB-1	31.0 ~ 45.8	5	5.59	1.69×10^{-14}	1.10×10^{-14}
		10	14.09	1.29×10^{-14}	
		15	22.49	1.17×10^{-14}	
		10	15.56	1.16×10^{-14}	
		20	32.18	1.04×10^{-14}	
		30	44.23	1.08×10^{-14}	
	48.5 ~ 61.6	30	2.00	3.05×10^{-13}	2.34×10^{-13}
		60	4.68	2.68×10^{-13}	
		90	8.48	2.18×10^{-13}	
	59.5 ~ 62.5	5	>100	-	-
	70.0 ~ 77.1	5	13.36	1.24×10^{-14}	1.02×10^{-14}
		10	28.27	1.10×10^{-14}	
		15	44.71	9.69×10^{-15}	
	81.5 ~ 89.8	5	31.95	4.17×10^{-15}	4.30×10^{-15}
		10	59.38	4.02×10^{-15}	
		15	75.59	4.46×10^{-15}	
	89.8 ~ 94.4	15	12.34	5.66×10^{-14}	1.63×10^{-13}
		30	13.63	1.02×10^{-13}	
		60	17.79	1.53×10^{-13}	
		90	21.17	1.90×10^{-13}	
	51.0 ~ 58.6	5	18.72	8.05×10^{-15}	4.71×10^{-15}
10		58.50	4.37×10^{-15}		
15		76.92	4.65×10^{-15}		
59.8 ~ 69.7	30	2.24	3.54×10^{-13}	2.72×10^{-13}	
	60	5.55	2.80×10^{-13}		
	60	5.40	2.88×10^{-13}		
	90	9.02	2.55×10^{-13}		
69.5 ~ 75.3	30	11.64	1.01×10^{-13}	8.86×10^{-14}	
	60	24.11	9.22×10^{-14}		
	90	36.72	8.60×10^{-14}		
75.8 ~ 94.3	15	22.76	9.42×10^{-15}	7.04×10^{-15}	
	30	54.65	6.87×10^{-15}		
	45	75.36	6.92×10^{-15}		

(1995) 해석식으로 평가된 값보다 평균적으로 약 19% 가량 크게 나타났다. 평가된 투과도가 가장 작은 값을 나타낼 때 Suthersan (1997) 해석식의 결과가 최대 58% 가량 크게 나타났으며, 투과도가 증가하면 대부분 15% 이내의 비율로 나타났다. 이러한

차이는 해석시 시험조건 가정의 차이에 의한 것으로 판단된다.

3.4 정류상태와 부정류상태 해석 결과 비교

불포화 암반 투기시험에 의한 시추공의 시험구간

별 투과도 및 수리전도도의 대푯값을 도출하기 위하여 정류 및 부정류 상태로 해석한 결과를 비교하였으며, 산술평균값을 계산하였다(표 6).

정류상태와 부정류상태의 투과도 해석값을 비교해보면, 정류상태의 평가값이 부정류 상태의 평가값보다 평균적으로 2.45배 가량 큰 것으로 나타났다. 미국 지질조사소(USGS)에서 1990년에 Arizona주 옹회암지역에서 수행한 투기시험 해석결과에서도 정류상태로 해석된 투과도가 부정류상태의 반대수(semi-log) 직선법으로 해석한 투과도보다 2 ~ 3배(평균 2.62배) 가량 큰 것으로 나타났으며, 부정류상태 형태곡선법(type curve analysis)의 해석 결과는 semi-log 직선법의 85% 수준으로 나타난 바 있다(LeCain, 1995).

LeCain (1995)은 정류상태의 평가값이 부정류상태 평가값보다 크게 나타나는 원인은 부정류 상태의 해석은 측정된 압력변화 곡선의 중간부분에 맞춤(fitting)하게 되는 반면, 정류상태는 측정된 압력변화 곡선 후반부의 안정된 값을 이용하기 때문으로 판단하였다. 투기시험시 압력변화 곡선의 후반부에 안정된 구간이 나타나게 되는 이유는 이론적인 해석식은 유체의 방사상(radial) 흐름을 가정하지만, 단열암반에는 경사가 다른 여러 방향으로 단열망이 발달하여 일부 주입기체가 패커로 고립시킨 구간 외부로 이동하면, 단열망이 고정수두경계(constant head boundary)를 만난 것처럼 기능할 수 있기 때문으로 추정하였다. 이는 누수대수층(leaky aquifer)에서의 양수

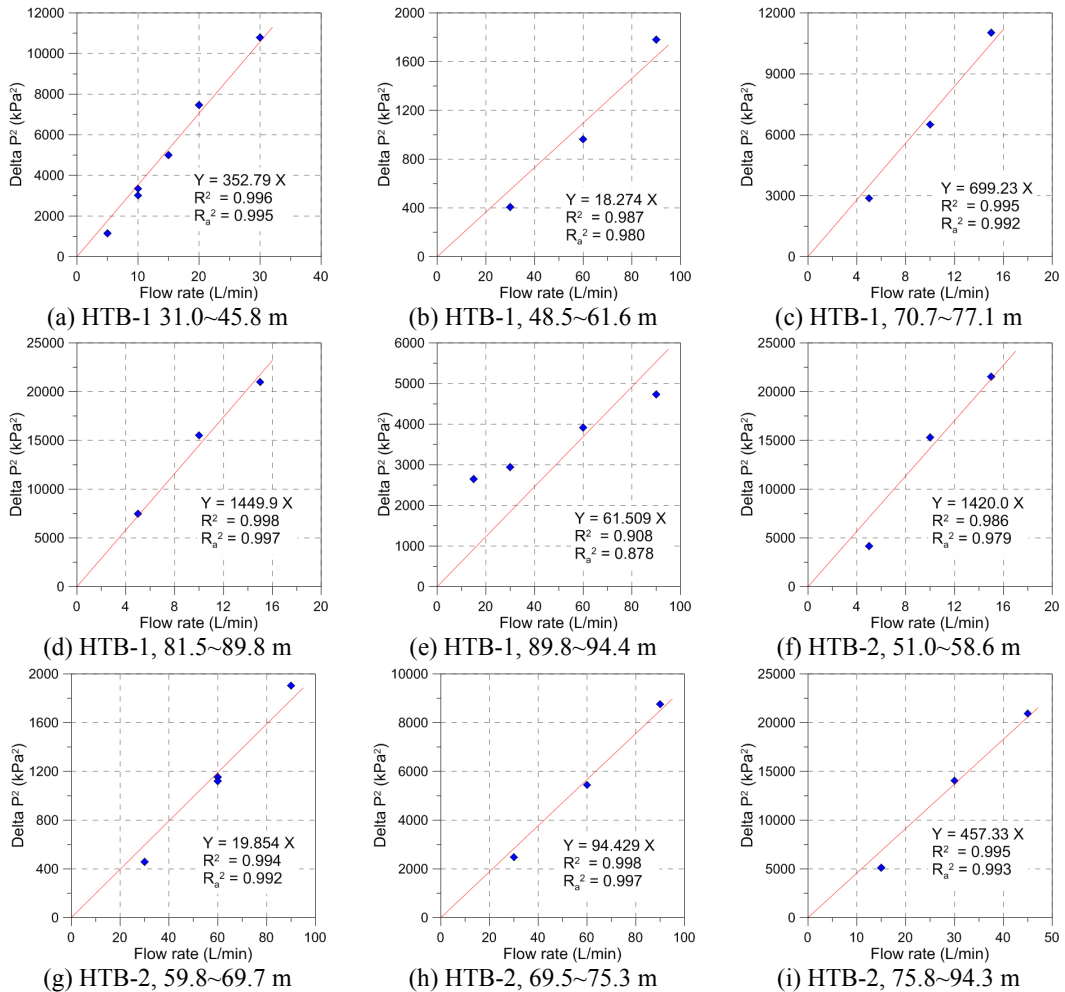


Fig. 4. Derivations of the representative permeability at each depth using squared pressure change and injection rate (steady-state).

시험시에 나타나는 현상과 유사할 수 있다. 반대수 (semi-log) 직선법이 형태곡선법(type curve analysis)보다 투과도가 크게 평가되는 것은 양수시험과 마찬가지로 시험초기 자료에서 관정 저류량 영향(wellbore storage effect)과 관련될 수 있다(Papadopoulos and Cooper, 1967).

정류상태와 부정류상태 해석결과의 평균값으로 시추공의 시험구간별 투과도를 검토해보면, HTB-1 시추공의 심도 48.5 ~ 61.6 m 및 89.8 ~ 94.4 m 구간과 HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간에서 투과도가 사질 퇴적층 수준인 10^{-13} m^2 으로 높게 나타나 유체의 주요한 이동통로가 될 수 있는 것으로

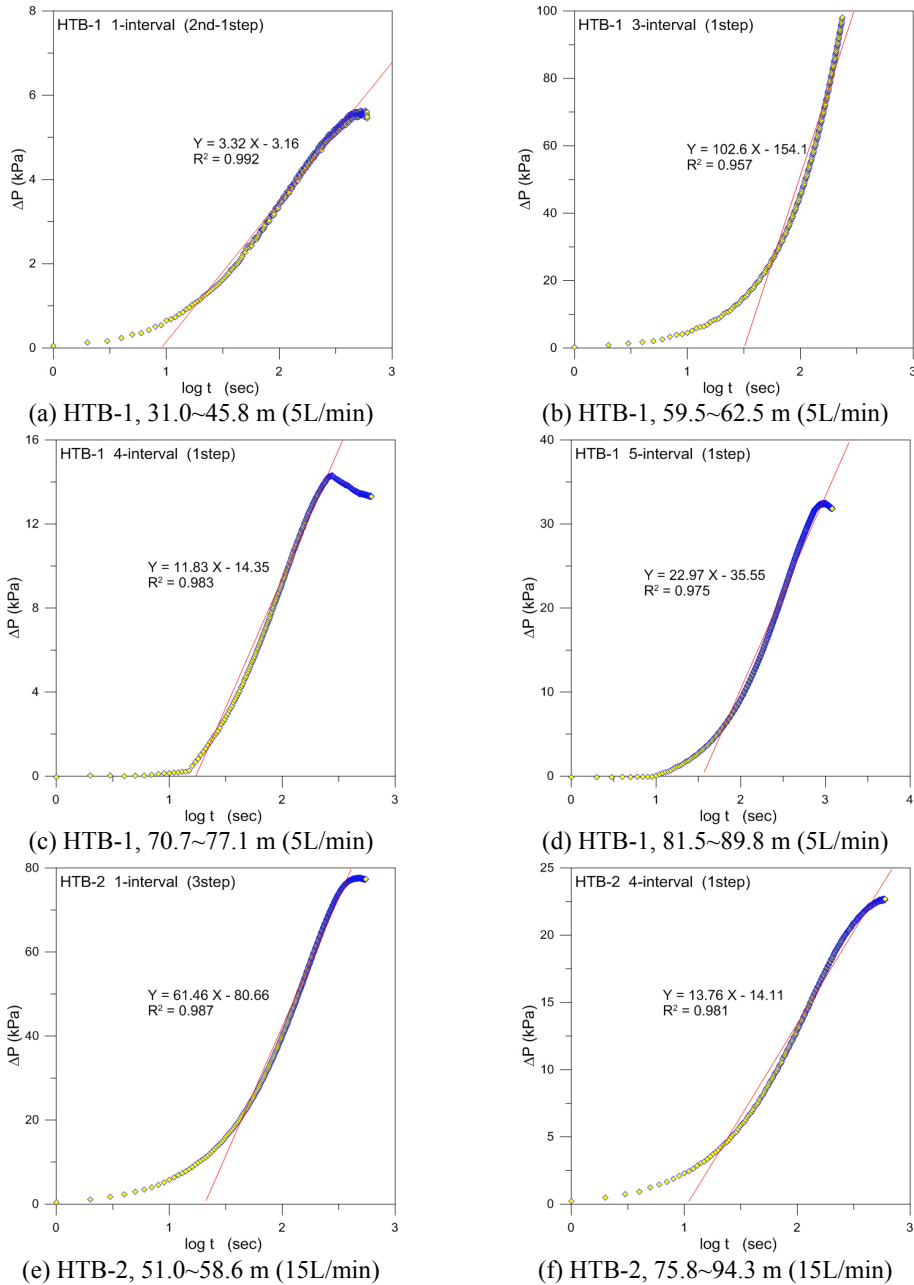


Fig. 5. Transient-state analysis of pneumatic test ? Suthersan (1997) method.

Table 5. Transient-state analysis results of pneumatic test.

Borehole	Test section (bgs, m)	Injection rate (L/min)	Suthersan (1997)		LeCain (1995)		Arithmetic average of two methods
			semi-log slop (kPa/sec)	Permeability (k, m ²)	semi-log slop (kPa ² /sec)	Permeability (k, m ²)	Permeability (k, m ²)
HTB-1	31.0~45.8	5	3.32	5.71×10^{-15}	687	5.46×10^{-15}	4.62×10^{-15}
		10	9.88	3.84×10^{-15}	2,173	3.45×10^{-15}	
		average		4.78×10^{-15}		4.46×10^{-15}	
	48.5~61.6	30	0.766	1.68×10^{-13}	157	1.61×10^{-13}	1.64×10^{-13}
	59.5~62.5	5	102.6	9.12×10^{-16}	31,959	5.76×10^{-16}	7.44×10^{-16}
	70.0~77.1	5	11.83	3.37×10^{-15}	2,675	2.92×10^{-15}	3.14×10^{-15}
	81.5~89.8	5	22.97	1.48×10^{-15}	5,364	1.24×10^{-15}	1.36×10^{-15}
HTB-2	51.0~58.6	15	2.95	6.18×10^{-14}	668	5.38×10^{-14}	5.78×10^{-14}
		5	11.64	3.17×10^{-15}	2,574	2.82×10^{-15}	
		10	43.73	1.69×10^{-15}	12,301	1.18×10^{-15}	
		15	61.46	1.80×10^{-15}	17,737	1.23×10^{-15}	
	average		2.22×10^{-15}		1.74×10^{-15}		
	59.8~69.7	30	0.579	2.94×10^{-13}	120	2.79×10^{-13}	1.69×10^{-13}
		60	2.96	1.15×10^{-13}	626	1.07×10^{-13}	
		90	4.45	1.15×10^{-13}	970	1.03×10^{-13}	
		average		1.74×10^{-13}		1.63×10^{-13}	
	69.5~75.3	30	8.75	3.35×10^{-14}	1,869	3.08×10^{-14}	3.21×10^{-14}
75.8~94.3	15	13.76	3.31×10^{-15}	3,211	2.79×10^{-15}	3.05×10^{-15}	

나타났다. 이 구간은 시추 중에 작업용수의 전량 또는 부분 누수가 발생한 구간이다. 반면 HTB-1 시추공의 심도 59.5 ~ 62.5 m 구간의 투과도는 $7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 으로 2층수 이상 작게 나타나서 해당구간이 상부와 하부의 지하수 흐름을 차단하는 역할을 하고 있음을 추정할 수 있다.

4. 수압시험 결과 및 해석

시추공의 구간별 수압시험 결과를 해석하기 위하여, 우선 각 단계별로 정류상태를 가정하여 앞의 2.2 절의 (식 10 ~ 12)를 이용하여 수리전도도와 루전값을 계산하였다. 이후 주입압력에 따른 flow pattern을 결정하여 최종적으로 시험 구간의 대표 수리전도도와 루전값을 평가하였다(표 7).

주입압력에 따른 흐름형태(flow pattern)는 시추공의 상부 일부 구간에서는 ‘dilation’으로 나타났으며, 대부분 구간은 ‘wash out’으로 나타났다. 이는

대기압 상태로 존재하던 단열이 물의 주입압력에 의해서는 확장되거나, 단열 내의 채움물질이 씻겨나가는 현상과 관련될 것으로 추정된다.

수리전도도의 최대값은 HTB-1 시추공의 심도 49.5 ~ 61.6 m 구간에서 $8.66 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 로 나타났으며, 최소값은 HTB-1 시추공의 심도 70.0 ~ 80.2 m 구간에서 $5.88 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. 평가된 수리전도도의 최소값과 최대값의 차이는 약 15배 가량으로 투기시험과 비교하면 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 수압시험 구간별로 보면, HTB-1 시추공에서 수리전도도가 상대적으로 크게 나타난 구간은 심도 49.5 ~ 61.6 m 및 89.5 ~ 97.0 m 구간으로 시추중 작업수의 전량 또는 부분 누수가 발생한 구간이다. HTB-2 시추공에서는 40.5 ~ 51.0 m 구간을 제외하고 시험 결과가 유사한 범위로 나타났는데, 이는 대부분 시험구간에 투수성이 높은 단열이 포함되었기 때문으로 추정된다.

한편, HTB-1 시추공의 심도 32.0 ~ 45.8 m 및 49.5 ~

Table 6. Comparison between the steady-state and transient-state analysis results of pneumatic test.

Borehole	Test section (bgs, m)	Steady-state (A)	Transient-state (B)	Arithmetic average	Etc. (ratio, A/B)
		Permeability (k, m ²)	Permeability (k, m ²)	Permeability (k, m ²)	
HTB-1	31.0 ~ 45.8	1.10×10^{-14}	4.62×10^{-15}	7.82×10^{-15}	2.39
	48.5 ~ 61.6	2.34×10^{-13}	1.64×10^{-13}	1.99×10^{-13}	1.43
	59.5 ~ 62.5	-	7.44×10^{-16}	7.44×10^{-16}	-
	70.0 ~ 77.1	1.02×10^{-14}	3.14×10^{-15}	6.65×10^{-15}	3.23
	81.5 ~ 89.8	4.30×10^{-15}	1.36×10^{-15}	2.83×10^{-15}	3.16
	89.8 ~ 94.4	1.63×10^{-13}	5.78×10^{-14}	1.10×10^{-13}	2.81
HTB-2	51.0 ~ 58.6	4.71×10^{-15}	1.98×10^{-15}	3.34×10^{-15}	2.38
	59.8 ~ 69.7	2.72×10^{-13}	1.69×10^{-13}	2.20×10^{-13}	1.61
	69.5 ~ 75.3	8.86×10^{-14}	3.21×10^{-14}	6.04×10^{-14}	2.76
	75.8 ~ 94.3	7.04×10^{-15}	3.05×10^{-15}	5.04×10^{-15}	2.31

Table 7. Analysis results of lugeon test.

Borehole	Test section (bgs, m)	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)	lugeon value	Flow pattern	Etc.
HTB-1	49.5 ~ 61.6	8.66×10^{-5}	5.673	Dilation	leakage during boring
	70.0 ~ 80.2	5.88×10^{-6}	0.397	Wash-Out	
	81.5 ~ 91.1	9.62×10^{-6}	0.657	Wash-Out	
	89.5 ~ 97.0	3.11×10^{-5}	2.218	Wash-Out	leakage during boring
HTB-2	40.5 ~ 51.0	6.11×10^{-6}	0.410	Dilation	
	51.0 ~ 62.0	3.45×10^{-5}	2.299	Wash-Out	
	61.5 ~ 73.0	5.45×10^{-5}	3.601	Wash-Out	
	73.0 ~ 84.0	3.06×10^{-5}	2.039	Wash-Out	
	83.5 ~ 95.0	3.50×10^{-5}	2.311	Wash-Out	

52.6 m 구간에서는 각각 40분간 정압주입시험(constant pressure injection test)을 수행하였다. 정압주입시험은 일반적으로 부정류 상태로 해석하는데, 금번 시험결과는 시험초기부터 주입량의 변화가 크지 않고 빠르게 준정류상태에 도달하므로 정류상태의 Thiem (1906) 해석식을 변형한 (식 10)을 이용하여 수리전도도를 평가하였다. 평가된 수리전도도는 심도 32.0 ~ 45.8 m 구간에서 1.53×10^{-5} cm/sec, 심도 49.5 ~ 52.6 m 구간에서 4.20×10^{-6} cm/sec로 나타났다.

5. 투기시험 및 수압시험 결과 비교 검토

투기시험과 수압시험의 시험구간이 정확하게 일

치하지는 않으나, 두 가지 시험 방법에 의해 도출된 투과도 또는 수리전도도가 적합한지 여부를 판단하고, 불포화 단열암반에 보다 적합한 현장시험을 평가하기 위하여 두 가지 시험방법을 통하여 도출된 결과를 비교하였다(표 8).

투기시험과 수압시험으로 평가된 투과도 또는 수리전도도가 유사하게 나타난 구간은 시추공 HTB-1의 심도 약 70 ~ 80 m 구간이며, 다른 구간은 수배의 차이를 나타내었다. 특징적으로 시추과정에서 작업용수 누수가 발생하였던 단열을 포함한 시험구간들에서는 투기시험을 통하여 평가된 투과도가 수 $\times 10^{-13}$ m²(수리전도도 수 $\times 10^{-4}$ cm/sec)로 상당히 크게 나타났다으며, 이들 구간의 투과도는 수압시험으로 평가

Table 8. Comparison of results between pneumatic test and hydraulic test.

Borehole	Pneumatic test (A)			Hydraulic test (B)			Etc. (ration, A/B)
	Test section (bgs, m)	Permeability (k, m ²)	Hydraulic conductivity* (K, cm/sec)	Test section (bgs, m)	Permeability** (k, m ²)	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)	
HTB-1	31.0~45.8	7.82×10^{-15}	7.65×10^{-6}	32.0~45.8	1.56×10^{-14}	1.53×10^{-5}	A/B = 0.50
	48.5~61.6	1.99×10^{-13}	1.95×10^{-4}	49.5~61.6	8.86×10^{-14}	8.66×10^{-5}	A/B = 2.25 (including the fractures where water leakage occurred during drilling)
	70.0~77.1	6.65×10^{-15}	6.51×10^{-6}	70.0~80.2	6.01×10^{-15}	5.88×10^{-6}	A/B = 1.11
	81.5~89.8	2.83×10^{-15}	2.77×10^{-6}	81.5~91.1	9.84×10^{-15}	9.62×10^{-6}	A/B = 0.29
	89.8~94.4	1.10×10^{-13}	1.08×10^{-4}	89.5~97.0	3.18×10^{-14}	3.11×10^{-5}	A/B = 3.47 (including the fractures where water leakage occurred during drilling)
-	-	-	40.5~51.0	6.25×10^{-15}	6.11×10^{-6}	-	
	51.0~58.6	3.34×10^{-15}	3.27×10^{-6}	51.0~62.0	3.53×10^{-14}	3.45×10^{-5}	A/B = 0.09
	59.8~69.7	2.20×10^{-13}	2.15×10^{-4}				A/B = 3.95, 1.08
HTB-2	69.5~75.3	6.04×10^{-14}	5.91×10^{-5}	61.5~73.0	5.57×10^{-14}	5.45×10^{-5}	(The section where water leakage occurred during drilling: 63~67 m)
				73.0~84.0	3.13×10^{-14}	3.06×10^{-5}	A/B = 0.16, 0.14
	75.8~94.3	5.04×10^{-15}	4.93×10^{-6}	83.5~95.0	3.58×10^{-14}	3.50×10^{-5}	(The section where water leakage occurred during drilling: 91~95 m)

* The value obtained by converting the permeability using the properties of groundwater of 20°C

** The value obtained by converting the hydraulic conductivity using the properties of groundwater of 20°C

된 값보다 2 ~ 4배 가량 큰 값을 나타내었다. 투과도가 높게 나타난 구간은 투기시험을 기준으로 HTB-1 시추공의 심도 48.5 ~ 61.6 m 구간(누수단열 60.6 m, 61.4 m 포함), 심도 89.8 ~ 94.4 m 구간(누수단열 90.5 m, 94.2m 포함), HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간(누수단열 63.5 m, 65.2 m, 66.7 m 포함)이다. 이들 구간에서 수압시험을 통하여 평가된 투과도(또는 수리전도도)가 상대적으로 작게 나타난 것은 수압시험의 단계별 해석식의 기본조건인 포화상태의 정류흐름을 만족시킬 정도로 물의 주입이 이루어지지 못하였거나, 단열의 거칠기 변화 등으로 인해 간극이 협소한 단열로는 물이 공기를 밀고 들어가지 못하여 물의 유동경로가 제한되었기 때문으로 추정된다(Pruess and Tsang, 1990). 예외적으로 누수단열이 발달한 HTB-2 시추공의 심도 75.8 ~ 94.3 m 구간(91.2 m, 93.0 m 포함)은 오히려 수압시험을 통해 평가된 투과도가 6 ~ 7배 크게 나타났다. 이는 투수성단열(누수단열)이 지하수면 근처에 고각의 경

사각을 가져서 단열이 물로 채워져 있어 기체의 이동 경로가 형성되지 못하였기 때문으로 추정된다. 한편 투기시험을 통하여 평가된 투과도가 수 $\times 10^{-15}$ m²(수리전도도 수 $\times 10^{-6}$ cm/sec)로 낮은 경우에는 대부분 수압시험으로 평가된 투과도가 오히려 2 ~ 10배 가량 크게 나타났다. 이는 시험구간 내의 단열의 간극(aperture)이 작아 모세관압에 의해 자연적인 간극수 또는 시추 작업용수 등이 단열을 대부분 채우고 있어 주입 기체가 침투할 수 없기 때문으로 추정된다. 투기시험과 수압시험으로 평가된 투과도가 유사하게 나타날 수 있는 조건은 HTB-2 시추공의 심도 69.5 ~ 75.3 m 구간의 시험결과를 고려할 때, 투과도가 수 $\times 10^{-14}$ m²(수리전도도 수 $\times 10^{-5}$ cm/sec) 가량인 단열암반인 것으로 추정된다.

불포화 암반에서 수행한 현장 투기시험과 수압 시험 결과를 이용하여 매질의 고유 투과도(intrinsic permeability)를 정확하게 평가하기 위해서는 함수비를 측정하여 물/공기의 포화도(saturation)를 측

정하여야 하며, 포화도를 이용하여 상대전도도/투과도(relative conductivity/permeability, 0 ~ 1의 값을 갖는 함수비에 다른 함수)를 평가하여야 한다. 그러나 현장에서 불포화 단열암반의 함수비를 측정하는 것은 어렵기 때문에 심도별 투기시험과 수압시험은 공기나 물의 상대포화도가 100%라는 가정을

기반하여 수행될 수밖에 없다. 그러나 앞서 개별 구간의 현장시험 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 단열암반의 투과도는 심도에 따라 크게 변하기 때문에 모든 시험구간에서 그러한 가정을 만족시키는 것은 어렵다. 그런데, 물 또는 공기의 포화도가 반영된 투과도나 수리전도도는 매질 고유투과도 또는 포화대

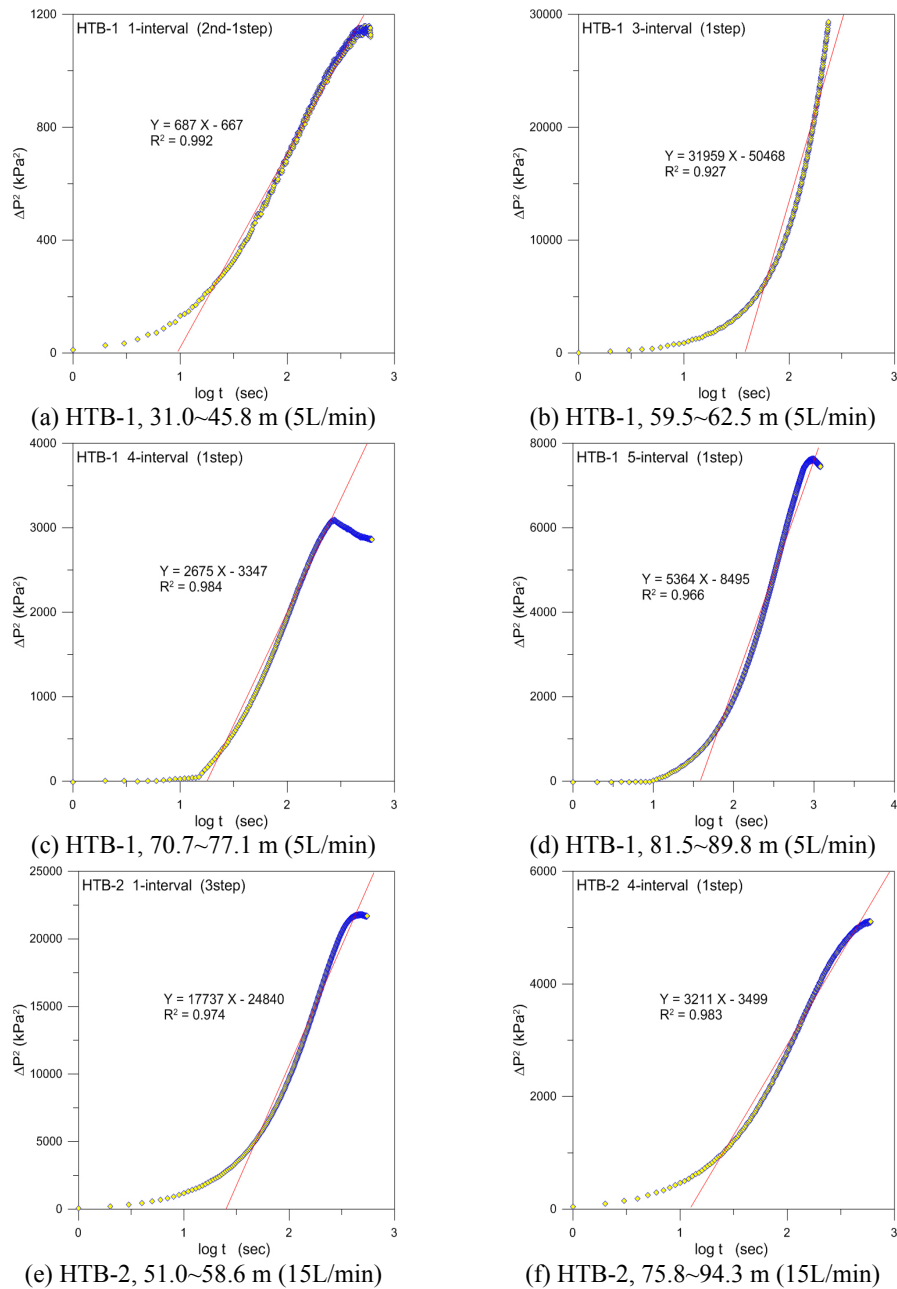


Fig. 6. Transient-state analysis of pneumatic test? LeCain (1995) method.

수리전도도(K_s)보다 작을 수 밖에 없으므로, 매질의 실제 수리특성은 투기시험과 수압시험의 결과 중에 크게 해석된 값에 가까울 수 밖에 없다. 따라서 투기 시험과 수압시험을 병행하여 도출된 투과도 중에서 큰 값을 택하는 방식은 개별시험의 한계를 극복하고 매질의 실제 수리특성과 유사한 값을 도출할 수 있다. 그림 7은 두 현장시험 방법을 이용하여 최종적으로 도출할 수 있는 심도에 따른 투과도 값의 분포를 나타낸 것이다. 그림은 불포화 암반에서 지하수가 빠르게 이동하는 투수성 단열구간을 파악하는 현장 시험으로는 수압시험보다 투기시험이 더 적합하며, 반대로 단열발달이 미약한 저투수성 구간에서는 수압시험이 더 적합할 수 있음을 지시한다.

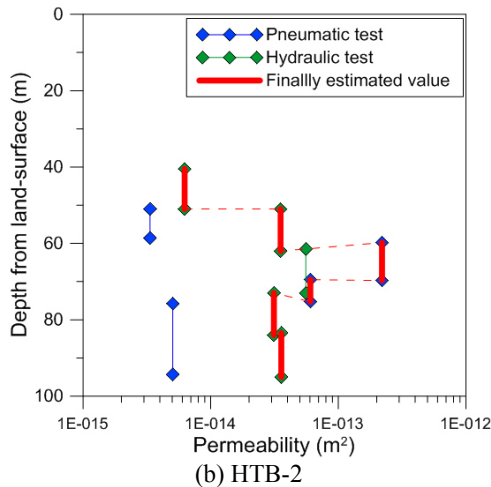
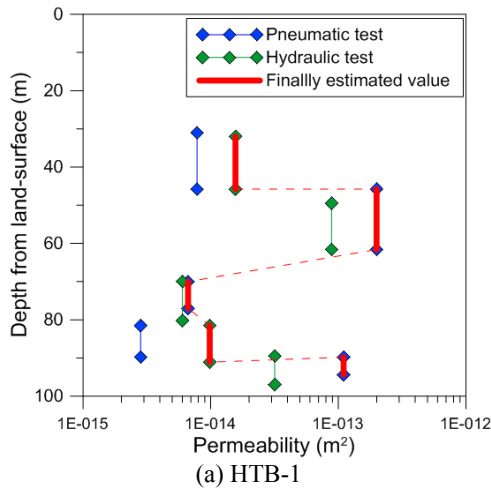


Fig. 7. Finally estimated permeabilities by depths based on the results of pneumatic test and hydraulic test.

6. 결론 및 토의

우리나라에서는 불포화 암반에 대한 수리지질 특성 조사의 필요성이 적었기 때문에 관련된 연구 및 기술개발이 거의 수행되지 않았다. 그러나 근래 대규모 지하공간 이용시설의 건설에 따른 다량의 지하수 유출로 국지적으로 두꺼운 불포화 암반이 형성되어 이들에 적합한 수리지질 특성 조사방법의 정립이 요구되고 있다. 불포화대 암반은 일부 간극수 외에 대부분 공기로 채워져 있으므로 자연적인 상태와 유사한 단열조건에서 암반의 투과도를 조사할 수 있는 방법은 투기시험이다. 이에 불포화대가 깊게 발달한 지역의 단열암반에 시추공을 굴착하여 구간별 투기 시험을 수행하였으며, 한편 투기시험 결과의 적정성과 한계를 검토하기 위하여 수리시험인 구간별 수압 시험을 병행하여 해석결과를 비교·검토하였다.

현장 투기시험은 2개 시추공의 굴착과정에서 그라우팅하지 않은 굴진구간에 대하여 단일 패커로 하향식으로 수행하였으며, 시험결과는 정류상태 및 부정류상태로 구분하여 해석하였다. 구간별 시험결과에 의하면, 시추 중에 작업용수의 전량 또는 부분 누수가 발생한 HTB-1 시추공의 심도 48.5 ~ 61.6 m 및 89.8 ~ 94.4 m 구간과 HTB-2 시추공의 심도 59.8 ~ 69.7 m 구간에서 투과도가 사질 퇴적층 수준인 약 $2 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ (수리전도도 약 $2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$)으로 높게 나타나 주요한 지하수 침투 및 이동경로가 될 수 있는 것으로 나타났다. 반면 HTB-1 시추공의 심도 59.5 ~ 62.5 m 구간의 투과도는 약 $7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ (수리전도도 약 $7 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$)으로 작게 나타나서 상하부의 수직적인 지하수 흐름을 차단하는 역할을 하고 있음을 확인하였다.

투기시험과 수압시험을 통하여 평가된 투과도의 비교결과에 의하면, 투기시험으로 평가된 투과도가 수 $\times 10^{-13} \text{ m}^2$ 수준으로 높은 구간에서는 투기시험 결과가 수압시험보다 2 ~ 4배 가량 큰 값을 나타내었다. 반면 투기시험으로 평가된 투과도가 수 $\times 10^{-15} \text{ m}^2$ 으로 낮은 경우에는 수압시험으로 평가된 투과도가 오히려 2 ~ 10배 가량 크게 나타났다. 이러한 결과는 불포화 암반의 투수성이 높은 구간에서 수압시험이 이론적 해석조건인 모든 단열을 포화된 상태의 정류상태 지하수 흐름을 만족시키지 못하였기 때문으로 추정되며, 반면 투수성이 낮은 구간에서는 미세단열

이 모세관압에 의해 간극수로 채워져 있어 투기시험 시에 기체의 흐름이 크게 제한되기 때문에 추정되었다. 그런데, 물 또는 공기의 포화도가 반영된 투과도나 수리전도도는 매질 고유 투과도보다 작을 수밖에 없으므로, 매질의 실제 수리특성은 투기시험과 수압시험의 결과 중에 크게 해석된 값에 가까울 수밖에 없다. 따라서 투기시험과 수압시험을 병행하여 도출된 투과도 중에서 큰 값을 택하는 방식은 개별 시험의 한계를 극복하고 실제 매질의 특성과 유사한 투과도를 도출할 수 있었다.

본 연구를 통하여 불포화 단열암반에서 현장 투기시험이 지하수가 빠르게 이동하는 투수성 단열구간에서 수압시험보다 투과도를 효과적으로 조사하는데 활용될 수 있음을 확인하였다. 한편 단열의 발달이 미약한 저투수성 구간에서는 모세관압에 의해 간극이 물로 포화되어 있어 투기시험의 수행이 어려우며 수압시험이 수리지질특성 조사에 더 적합할 수 있다는 것을 확인하였다. 그러나 저투수성 구간에서 투기시험이나 투수성 구간에서 수압시험은 적합한 결과를 도출하지 못하였는데, 이는 단열암반의 투과도가 심도에 따라 크게 변하여 현장시험시 공기 또는 물의 상대포화도가 100%에 가깝다는 가정을 만족시키지 못하기 때문이다. 따라서 불포화 단열암반에서 개별 현장시험 방법이 가지는 한계를 극복하고 실제 매질의 수리특성과 유사한 투과도를 도출하기 위해서는 현장 투기시험과 수리시험(수압시험)이 병행되어 비교·검토되어야 할 것으로 판단된다. 금번 연구결과는 다소간의 한계에도 불구하고 국내 불포화 암반의 수리지질 특성조사 방법을 정립하는데 주요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)에서 위탁시행한 에너지기술개발사업(No. 20141720100610)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Cho, S.I., Kim, C.S., Kim, K.S., Song, M.Y. and Jeon, H.S., 2004, Characterization of a groundwater system by sub-

- surface hydrogeological investigation data. *The Journal of Engineering Geology*, 14(1), 93-104 (in Korean with English abstract).
- Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, U.S. National Research Council, 1996, *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions, American Geophysical Union*, 27, 526-534.
- Energy Resource Conservation Board, 1975, *Theory and Practice of the Testing of Gas Well*. 3rd ed., Calgary, Alberta, Canada.
- Guzman, A.G., Geddis, A.M., Henrich, M.J., Lohrstorfer, C. and Neuman, S.P., 1996, Summary of air permeability data from single-hole injection tests in unsaturated fractured tuffs at the Apache Leap Research Site: Results of steady-state test interpretation: Washington, D.C., U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6360, 198 p.
- Ha, J.C., Lee, J.H., Cheong, J.Y. and Jung, H.R., 2016, Numerical Simulation of Groundwater Flow in Heterogeneous Rockmass of Unsaturated Condition. *The Journal of Engineering Geology*, 26(1), 87-99 (in Korean with English abstract).
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions, American Geophysical Union*, 36(1), 95-100.
- Houlsby, A.C., 1976, Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 9(4), 303-313.
- Hvorslev, M.J., 1951, Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations. Bulletin no 36, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, 55 p.
- Hyun, Y., Neuman, S.P., Vesselinov, V.V., Illman, W.A., Tartakovsky, D.M. and Di Federico, V., 2002, Theoretical interpretation of a pronounced permeability scale effect in unsaturated fractured tuff. *Water Resource Research*, 38(6), doi:10.1029/2001WR000658.
- Illman, W.A., 1999, Single- and cross-hole pneumatic injection tests in unsaturated fractured tuffs at the Apache Leap Research Site near Superior. Ph.D. thesis, University of Arizona, USA, 311 p.
- Illman, W.A., 2005, Type curve analyses of pneumatic single-hole tests in unsaturated fractured tuff: Direct evidence for a porosity scale effect. *Water Resource Research*, 41, W04018, doi:10.1029/2004WR003703.
- Illman, W.A. and Neuman, S.P., 2000, Type-Curve Interpretation of Multirate Single-Hole Pneumatic Injection Tests in

- Unsaturated Fractured Rock. *Groundwater*, 38(6), 899-911.
- Ji, S.H., Park, K.W., Lim, D.H., Kim, C.S., Kim, K.S. and Dershowitz, W., 2012, A hybrid modeling approach to evaluate the groundwater flow system at the low and intermediate-level radioactive waste disposal site in Gyeong-Ju, Korea. *Hydrogeology Journal*, 20, 1341-1353.
- Kim, J.D., Kim, Y.L., Hwang, K.Y. and Yi, S.C., 2000, A Field Study on Remediation of Gasoline Contaminated Site by Soil Vapor Extraction. *Journal of KoSES*, 5(1), 13-23 (in Korean with English abstract).
- KHNP, 2007, Safety assessment report on the repository for low and intermediate radioactive wastes in Gyeong-Ju. Korea Hydro and Nuclear Power, Seoul.
- LeCain, G.D., 1995, Pneumatic testing in 45-degree-inclined boreholes in ash-flow tuff near superior, Arizona. *Water-Resources Investigation Report 95-4073*, U.S. Geological survey, 27 p.
- LeCain, G.D., 1997, Air-injection testing in vertical boreholes in welded and nonwelded tuff, Yucca Mountain, Nevada. *Water-Resources Investigation Report 96-4262*, U.S. Geological survey, 33 p.
- Lee, C.Y., Jang, W.Y., Jeon, Y.H., Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, A Study on Air Permeability and Radius of Influence During SVE/Bioventing. *Journal of Korean Society of Groundwater Environment*, 7(1), 24-31 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.N.M. and Yeo, I.W., 2013, A Study on Unsaturated Zone Characterization and Feasibility of Soil Vapor Extraction at a DNAPL-contaminated Site in Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(6), 48-55.
- Papadopoulos, I.S., Cooper, H.H., 1967, Drawdown in a well of large diameter. *Water Resource Research*, 3(1), 241-244.
- Pruess, K. and Tsang, Y.W., 1990, On two-phase relative permeability and capillary pressure of rough-walled rock fractures. *Water Resource Research*, 26(9), 1915-1926.
- Royle, M. and Sc, M.A., 2002, Standard operating procedures for borehole packer testing. 22 p.
- Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P., 1999, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Suthersan, S.S., 1997, *Remediation Engineering: design concepts*. CRC Press Inc., United States of America, 362 p.
- Thiem, G., 1906, *Hydrologische Methoden* (in German). Leipzig: J.M. Gebhardt: 56 p.
- Vesselinov, V.V. and Neuman, S.P., 2001, Numerical inverse interpretation of single-hole pneumatic tests in unsaturated fractured tuff. *Ground Water*, 39(5), 685-695.

Received : January 5, 2017

Revised : May 16, 2017

Accepted : June 15, 2017