

결정질 암반의 투수량계수 도출을 위한 펄스시험의 적용성 연구

박경우^{1*} · 박병학² · 고낙열³ · 지성훈¹

¹한국원자력연구원 책임연구원, ²한국원자력연구원 박사후연구원, ³한국원자력연구원 선임연구원

Applicability of Pulse Tests to Estimate Transmissivity in Crystalline Rock

Kyung-Woo Park^{1*} · Byeong-Hak Park² · Nak-Youl Ko³ · Sung-Hoon Ji¹

¹Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

²Post Doctorial Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

³Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract

In this study, pulse tests were undertaken at an underground research facility, as part of in-situ hydraulic tests, to derive the hydrogeological characteristics of crystalline rock. The applicability of pulse tests for estimating the transmissivity of a fractured rock mass was evaluated by comparing the results to those from a slug test. Results from the pulse and slug tests were very similar for the test section, with both tests indicating low transmissivity. A slight difference between the results of pulse and slug tests, however, was observed in the section with the transmissivity larger than $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, which is likely due to the difference in the radii of influence of the tests. Furthermore, when the pulse test was conducted in permeable zones where transmissivity was larger than $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, it was difficult to produce accurate results. This lack of accuracy was due to the rapid recovery of the hydraulic head in these permeable test zones. When performing pulse tests, it was important to accurately measure the pressure when valves were opened and closed in order to apply the head change in the test section. Although it is difficult to derive the hydrogeological characteristics from pulse tests in areas with high permeability, these tests can be used as an economical test method for identifying hydrogeological characteristics in a relatively short time, especially when deriving the transmissivity of rocks with low permeability.

Keywords: crystalline rock, underground research facility, in-situ hydraulic test, pulse test, slug test

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Kyung-Woo Park
E-mail: woosbest@kaeri.re.kr

Received: 17 July, 2020
Revised: 25 August, 2020
Accepted: 27 August, 2020

© 2020 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 논문에서는 결정질 암반에 건설된 지하연구시설에서 암반의 수리지질특성을 도출하기 위해 수행할 수 있는 현장수리시험의 방법으로 펄스시험을 소개하였다. 아울러 지하연구시설에서 수행한 슬러그시험과 펄스시험의 결과를 비교하여 결정질 암반의 수리지질특성 도출에 대한 펄스시험의 적용 가능성을 평가하였다. 펄스시험과 슬러그시험의 결과를 비교해 볼 때, 매질의 투수성이 낮은 시험구간에서는 그 결과가 매우 유사하게 도출되었지만 투수량계수가 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상인 구간에서는 약간의 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 투수성의 차이는 수리시험 시 적용되는 수리 영향 반경의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 시험결과를 통하여 펄스시험을 투수량계수가 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상인 시험구간에서 수행할 때, 시험 중 빠른 수두회복 때문에 정확한 시험결과를 도출하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 펄스시험은

비록 투수성이 큰 구간에서 수리지질특성을 도출하기 어렵지만, 저투수성 매질의 암반에서의 수리지질특성을 도출할 때 비교적 빠른 시간에 수리지질특성을 파악할 수 있는 경제적인 시험 방법이라고 제안할 수 있다.

주요어: 결정질 암반, 지하연구시설, 현장수리시험, 펄스시험, 슬러그시험

서론

방사성폐기물의 최종 처분으로 심층 처분을 고려할 때 처분에 적합한 환경에 대해 IAEA는 다음과 같이 기술하고 있다 (IAEA, 1994). 장기 지질 환경의 변화를 고려해 볼 때 최종 처분장으로 고려되는 부지가 구조적으로 안정한 지괴에 위치해야 하며 기후 변화가 심부의 처분 영역에 영향을 미치지 않는 기후에 대한 탄력성을 갖고 있어야 한다. 수리지질학적 측면으로는 처분 대상 심도에서 지하수의 흐름이 거의 없고, 처분 영역에서 일정한 거리 내에 지하수의 유동으로 잠재성을 갖는 투수성 지질구조가 없어 처분 심도의 지하수 시스템이 생태계에 이르기까지 가능한 격리된 조건을 유지해야 한다. 지화학적인 관점에서 바라보면 처분 영역의 지하수가 방사성 핵종이 잘 침전될 수 있는 환원 환경 상태에 있어야 하고, 처분장에서 발생하는 가스를 잘 분산할 수 있는 매질 및 지하수 조건이 선호된다. 이를 수리지질학적 조건과 함께 고려해 보면 처분장에서 누출될 수 있는 핵종이 지하수의 흐름에 따른 이송 보다는 확산에 의해 이동되어야 하며, 결과적으로 처분 영역에 부존하는 지하수는 그 연대가 오래된 것이어야 한다. 한편 앞서 기술한 처분장으로 선호되는 지질조건에서 수리지질-지화학적 조건에 대한 관심 주제는 지하수의 흐름이라는 말로 요약할 수 있다. 결정질 암반을 모암으로 하는 처분 영역에서 지하수의 흐름은 주로 투수성 지질구조에서 발생하기 때문에 암반 내 존재하는 투수성 지질구조에 대한 투수성을 판단하는 것은 처분의 안전성에 주요한 영향을 주게 된다(IAEA, 1999). 스웨덴 SKB는 부지특성모델을 구축하기 위해 스웨덴의 결정질 암반을 다음 세 가지의 수리지질요소로 분류하였는데, 이는 지표면과 가장 근처의 토양층 및 풍화대인 수리토양대(Hydraulic Soil Domain, HSD), 결정질 암반인 수리암반대(Hydraulic Rock Domain, HRD), 그리고 암반 내 존재하는 투수성 단열대인 수리투수대(Hydraulic Conducting Domain, HCD)이다(Johan et al., 2002). 이렇게 수리지질모델의 요소를 세 가지로 구분한 이유는 처분장이 위치할 부지 고유의 특성과 관련하여 지하수 흐름에 대한 특성을 매질의 투수성으로 모델화하여 처분 안전성 평가를 위한 기초 자료로 활용하기 위해서이다.

이와 같이 결정질 암반을 모암으로 하는 부지 조건에서 지하수 흐름에 대한 특성을 설명하는 수리지질모델을 구축하기 위해서는 먼저 처분 심도보다 깊은 공간적인 영역을 포함하여 지질모델을 구축하고, 지질모델의 구성요소에 대한 수리지질특성을 파악하는 현장수리시험이 선행되어야 한다. 수리지질특성에 대한 정보를 획득하기 위해서는 투수성이 높은 수리토양대를 대상으로는 정률시험을 이용하고, 투수성이 낮은 수리암반대에서는 순간충격시험이나 정압시험을 이용하는 것이 일반적이다(Freeze and Cherry, 1979). 또한, 나공상태에서 수행되는 정률시험이나 순간충격시험은 고투수성의 상부 층적층으로 인해 결정질 암반의 수리지질특성을 도출하는데 제한적이므로 이중패커를 이용하여 정률시험, 정압시험, 순간충격시험 등 다양한 현장수리시험을 통해 결정질 암반의 수리지질특성을 도출하고 있다(Almén et al., 1986).

국내에서는 흔히 나공상태에서 양수시험과 순간수위변화시험을 이용하여 대수층의 수리지질특성을 평가하고 있는데, 이는 현장수리시험을 통해 도출하고자 하는 관심 영역이 지표 근처의 토양대나 그 하부의 풍화 암반에 국한되기 때문이다 (Lee and Lee, 1999; Jo et al., 2010). 한편 지하수면보다 상부에 분포하는 불포화대는 현장투기시험과 정압시험을 병행하여 수리지질특성에 대한 정보를 확보하였다(Jun et al., 2017). 국내에서 결정질 암반을 대상으로 기반암에 대한 수리지질특성을 파악하기 위해서 수행한 현장수리시험으로는 정압주입시험이 가장 일반적이다. 예컨대, 암반 대수층을 대상으로 유속 측정을 통한 수리전도도를 산정한 일부 연구가 있었으나, 원유 비축기지의 수리안정성 평가를 위한 기반암의 수리지

질특성 조사(Kim et al., 1997; Lee and Lee, 1998), 중저준위 방사성폐기물 처분장의 특성 평가(Kim et al., 2008) 등 결정질 암반을 대상으로 수리지질특성을 평가하기 위해서 대부분 정압주입시험을 이용하고 있다. Almén et al.(1986)은 결정질 암반에서 시행되고 있는 여러 형태의 현장수리시험법을 비교한 후, 수리전도도를 추정함에 있어 비교적 정확하고 다른 수리시험에 비해 간편한 방법으로 정압주입시험을 추천하였다는 점에서 국내에서 활용하고 있는 정압주입시험의 유용성을 확보할 수 있을 것이다. 그러나 투수성이 낮은 결정질 암반에서 정압시험을 통해 수리지질특성을 확인하기 위해서는 시험구간에 일정한 압력을 유지하기 위한 기기가 필요하며, 시험구간으로 유입되는 유량을 정확히 관측해야 하는 어려움이 있기 때문에(Kim et al., 1993), 저투수성의 암반 매질에서는 적용하는 데에 주의를 요한다.

최근 방사성폐기물 처분을 위한 부지특성평가 연구에서 이중 패커를 이용한 현장수리시험을 수행하였는데, 정압시험, 순간충격시험을 연속적으로 수행하여 각 시험 결과의 유효성을 밝힌 바 있다(Park et al., 2020). 본 논문에서는 결정질 암반의 지하연구시설에서 수행한 순간충격시험에 대해 슬러그시험과 펄스시험에 대한 제반적인 절차상의 상이성을 분석하였고, 현장 시험 결과에 대해 비교하여 제시하였다. 이 결과를 바탕으로 특히 저투수성 매질의 투수성 정보를 획득하기 위해 수행할 비교적 빠른 시간에 수행할 수 있는 펄스시험의 적용성을 평가하고자 한다.

펄스시험의 특성과 해석

펄스시험의 특성

일반적으로 순간충격시험이라고 하면 부피를 알고 있는 더미(dummy)를 시추공 내 삽입하여 지하수위가 상승된 후 회복되는 수위를 관측하거나, 반대로 더미를 시추공 내 삽입한 후 지하수위가 안정되었을 때 더미를 끌어올려 수위를 강하시킨 후 회복되는 수위를 관측하는 방법을 일컫는다. 이를 Freeze and Cherry는 Piezometer Test라고 명명했고(Freeze and Cherry, 1979), 흔히 다른 명칭으로 슬러그시험이라고도 한다. 본 논문에서 기술하고자 하는 펄스시험은 대수층에 순간적으로 수두압 변화를 야기시킨 후, 시험 구간의 수두압으로 회복되는 양상을 관측하는 수리시험의 방법으로 슬러그시험과 비슷하다(Fig. 1의 Pressure 부분). 그러나 슬러그시험은 시험구간에 자극되는 수두압 변화가 시험구간에 주입되거나 시험구간에서 배출되는 유량에 의해 원래 수두로 회복되면서 해소되는 반면, 펄스시험은 시험 구간에 압력만 자극한 후 원래의 수두압으로 회복하는 것을 관측하는 시험이다(Wang et al., 1977). 즉, 순간적으로 시험 구간과는 다른 압력으

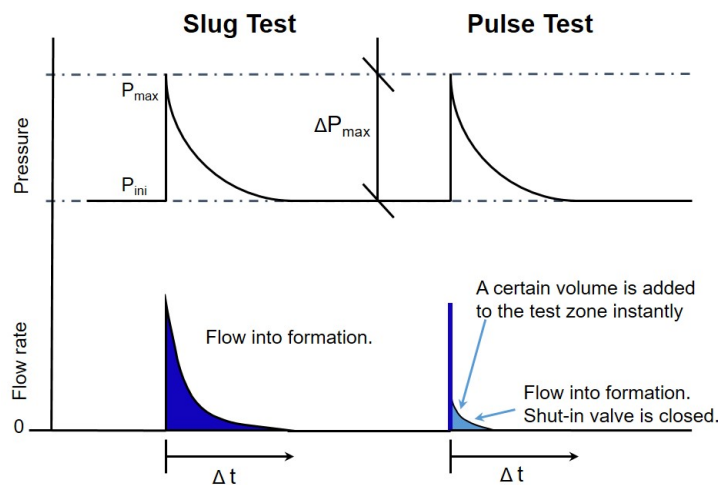


Fig. 1. Comparison of pressure response and flow rate change during slug and pulse tests.

로 유체를 이용하여 압력을 제공해 주고 즉시 유체의 흐름을 폐쇄하여 압력 회복을 관측하는데, 이 때 수두압 변화를 위해 가해주는 압력에 의해 일정 부피의 유체가 시험구간의 대수층으로 주입된다(Fig. 1의 Flow rate 부분).

펄스시험에 대한 시험 장치 및 과정을 Fig. 2에 간략히 도시하였다. 먼저 시험구간에 이중패커와 함께 현장시험장치를 설치시킨다. 이중패커를 이용하여 시험구간을 수리적으로 격리하게 되면, 이중패커가 팽창함에 따라 시험구간 내 수두압이 고유의 수두값(시험관 상단부의 해발고도- z_0)으로 안정화된다. 시험구간의 수두가 충분히 안정화된 후, 시험구간에 압력을 전달하기 위해 밸브를 닫고 물을 주입하여 펄스시험에 필요한 압력(z_0-z_1)을 준비한다. 이 때 시험구간의 수두압은 밸브의 폐쇄로 인해 고유의 수두값을 유지하고 있다. 다음 단계는 시험구간 상단에 장착된 밸브를 일시적으로 개방한 후, 다시 밸브를 닫음으로서 시험구간에(z_0-z_1)의 압력을 전달하고, 시간에 따라 수두압의 회복을 관측함으로써 시험을 종료한다. 펄스시험에서 밸브의 개방에 의해 시험구간에 유입되는 물의 부피를 정확히 관측해야 하는데, 압력의 변화에 대한 부피의 변화는 펄스시험에서 시험관의 등가반경을 산출하는데 이용되기 때문이다.

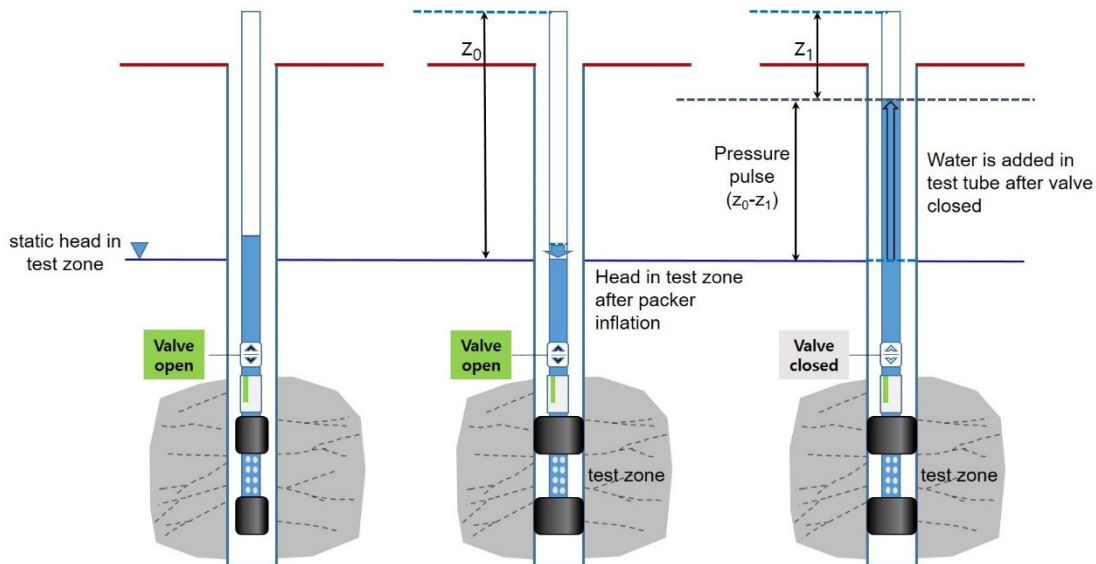


Fig. 2. The conceptual diagram of pulse test under pulse pressurized condition.

펄스시험의 해석

슬러그시험의 해석 방법으로 표준곡선중첩법을 이용하거나 직선법을 이용할 수 있다. 표준곡선중첩법은 Cooper et al. (1967)이 제안한 방법과 이를 보완하여 Bredehoeft and Papadopolos(1980)의 방법이 있으며, 직선법으로는 Hvorslev(1951)와 Bouwer and Rice(1976)가 제안한 방법이 있다. 본 논문에서는 지하처분연구시설 내 결정질 암반을 대상으로 수행한 슬러그시험을 해석할 때, 슬러그시험이 수행된 관정이 지하 공동 내 굴착되어 있고 이중 패커로 시험구간을 수리적으로 격리하였기 때문에 피압대수층임을 고려하여 Cooper et al.(1967)과 Bredehoeft and Papadopolos(1980)가 제안한 표준곡선중첩법을 이용하였다(Fig. 3). 표준곡선중첩법은 다음 몇 가지를 가정한다. 먼저 대수층의 수리지질특성이 균질(homogeneous)한 등방성(isotropic)을 가진 피압대수층이며, 현장시험을 위한 대수층이 균일한 두께를 갖고 무한하게 연장되어 있다. 또한, 시험을 위한 관정은 전체 대수층을 관통하여 굴착되어 있고, 이 관정에서 수행된 현장수리시험에서 지하수의 흐름은 다시(Darcy)의 법칙에 따르는 것으로 가정한다. 표준곡선중첩법을 이용하여 해석할 때, 슬러그시험과 펄스시험의 해석 방법은 동일하다. Cooper et al.(1967)과 Bredehoeft and Papadopolos(1980)은 순간충격시험결과 관측되는 시간에

따른 수두 변화에 대해 무차원 시간변수 (β)와 무차원 저유계수 (α)의 함수로 표준곡선에 중첩시켜 투수량계수와 저유계수를 구하였다. 다만, 펄스시험에서는 무차원시간변수와 무차원저유계수를 계산할 때 시험구간의 반경(r_c)이 아니라 등가 반경(r_e)을 대입하는데, 펄스시험은 가상의 반경(등가 반경)을 갖는 작은 관을 대상으로 슬러그시험을 수행한 것으로 이해하면 된다(Fig. 4). 여기서 등가반경(r_e)은 펄스시험 과정에서 시험구간의 compressibility(C)를 대수층에 가해지는 수두압의 순간적인 변화(ΔP)에 대해 시험구간에 주입되거나 배출되는 지하수의 유량(ΔV)에 대한 비율의 wellbore storage coefficient로 고려하고, 이를 통해 펄스시험에서 적용된 가상의 시험관에 대한 반경(r_e)을 구하는 방법을 이용한다(Walter et al., 2006).

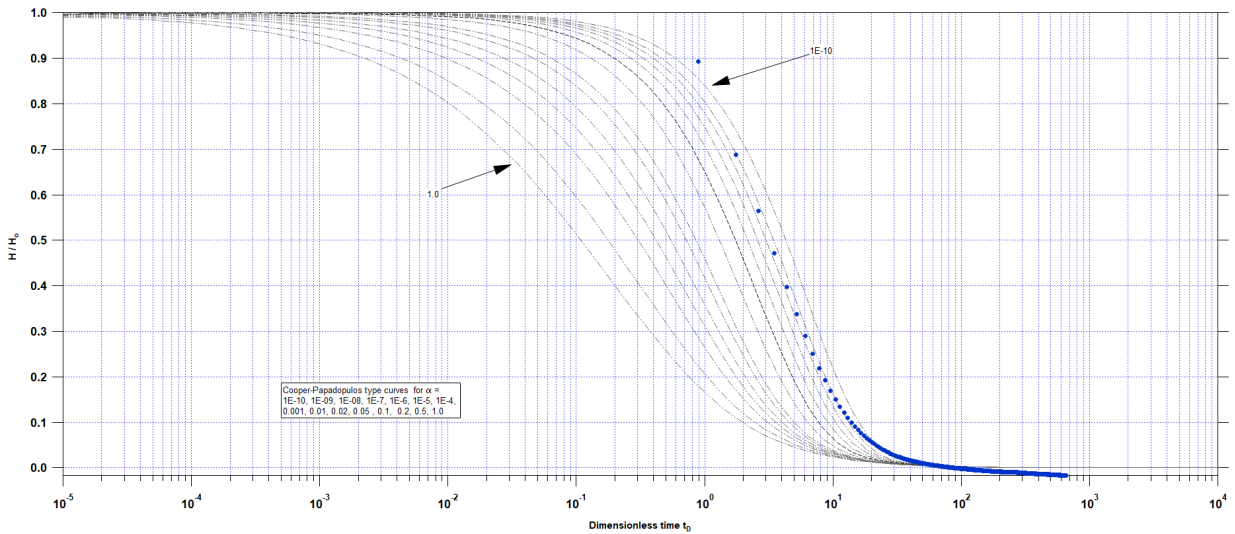


Fig. 3. Example of the type curve matching method for the analysis of the pulse test data. The plotted data were from the 1st pulse test of Section 1 in the borehole.

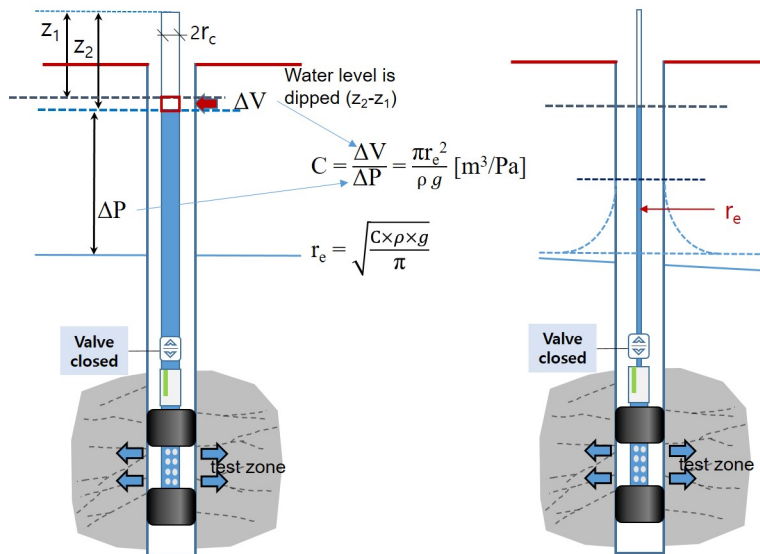


Fig. 4. Equivalent radius (r_e) for the pulse test analysis is calculated by the compressibility ($C = \nabla V / \nabla P$) of test zone (wellbore storage coefficient in a hydraulically isolated test zone). The ∇V is calculated by measuring the water level change ($z_2 - z_1$), and the ∇P is the value of pressure pulse in left figure.

펄스시험 결과

한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)에 건설된 지하연구시설인 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)에서 2018년 BDZ-1 시추공을 굴착하였으며, 2019년에 이 시추공에서 펄스시험과 슬러그시험을 수행하였다. BDZ-1 시추공은 3 inch (NX 규격) 직경으로 20 m의 심도를 갖고 KURT 내 연구용 모듈(No. 6)에 굴착되었으며, 현장시험을 위해 이중패커로 1.45 m의 시험구간을 설정하여 시추공의 바닥면에서부터 총 12개의 구간에서 펄스시험과 슬러그시험을 수행하였다(Table 1). KURT 바닥면의 해발고도는 80 m (E.L.)로 설계되었으며 각 시험구간의 수리수두가 Section 10과 Section 12를 제외하고 KURT의 바닥면 해발고도 보다 높기 때문에 10개의 시험구간에서 자분하는 양상을 보이고 있다. 따라서 Fig. 2에서 설명한 것과는 반대로 펄스시험과 슬러그시험에서 음의 수두압을 이용해 시험구간의 수리수두를 자극하여 현장수리시험을 수행하였다. 한편 슬러그시험의 경우 시험구간의 안정 수리수두가 KURT의 바닥면보다 현저히 높아 전체 수위회복을 관측하지 못하였으며(Table 1), 관측 가능한 높이까지의 수위회복 자료를 해석에 이용하였다.

Table 1. Stable hydraulic head in each test section and transmissivities obtained from the slug test and pulse test

| Test section | Test interval in the BDZ-1 (m, depth from the KURT surface) | | Hydraulic head (m, E.L.) | | Transmissivity (m ² /sec) | |
|--------------|--|-------|-----------------------------|-----------------|---|-----------|
| | From | To | H _{PT} | H _{ST} | Pulse test | Slug test |
| Section 1 | 18.00 | 19.45 | 101.39 | 101.34 | 2.69E-08 | 1.36E-08 |
| Section 2 | 16.55 | 18.00 | 90.37 | 89.38 | 1.77E-08 | 1.20E-08 |
| Section 3 | 15.10 | 16.55 | 102.62 | 102.87 | 4.32E-08 | 1.72E-08 |
| Section 4 | 13.65 | 15.10 | 97.38 | 99.85 | 5.47E-09 | 6.24E-09 |
| Section 5 | 12.20 | 13.65 | 105.97 | 104.77 | 8.97E-10 | 1.08E-09 |
| Section 6 | 10.75 | 12.20 | 81.12 | 81.09 | 7.07E-08 | 1.09E-07 |
| Section 7 | 9.30 | 10.75 | 105.44 | 105.02 | 1.11E-08 | 2.62E-08 |
| Section 8 | 7.85 | 9.30 | 90.01 | 90.19 | 1.94E-08 | 3.30E-08 |
| Section 9 | 6.40 | 7.85 | 86.66 | 86.31 | 2.83E-08 | 2.01E-08 |
| Section 10 | 4.95 | 6.40 | 80.29 | 80.57 | 3.58E-09 | 3.53E-09 |
| Section 11 | 3.50 | 4.95 | 90.95 | 91.66 | 4.02E-08 | 1.56E-08 |
| Section 12 | 2.05 | 3.50 | 82.33 | 80.46 | 1.61E-08 | 3.55E-08 |

BDZ-1 시추공에서 펄스시험과 슬러그시험을 통해 도출한 투수량계수를 Table 1에 제시하였다. 펄스시험으로 도출한 투수량계수의 평균은 $1.47 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이며, 펄스시험 후 수행한 슬러그시험에서는 $1.43 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 평균 투수량계수를 도출할 수 있어 펄스시험과 매우 유사한 결과가 산출되었다. 펄스시험을 통해 전체 시험 구간에서 $7.07 \times 10^{-8} \sim 8.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 투수량계수를 얻을 수 있었는데, 투수성이 가장 낮은 구간은 Section 5로 $8.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 투수량계수가, 그리고 투수성이 가장 큰 구간은 그 상부 구간인 Section 6으로 $7.07 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 투수량계수가 산출된다. 주목할 점은 공간적으로 1.45 m 이격된 구간에서 2 order에 가까운 투수성의 차이를 보인다는 것이다. 이러한 현상은 슬러그시험 결과에서도 확인할 수 있다. 펄스시험과 마찬가지로 투수성이 가장 낮은 구간은 Section 5로 $1.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 투수량계수를, 투수성이 가장 큰 구간은 그 상부 구간인 Section 6으로 $1.09 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 투수량계수가 산출되어 슬러그시험과 펄스시험은 서로 유사한 수리지질특성을 도출할 수 있는 것을 알 수 있다.

KURT 내 BDZ-1 시추공에서 수행한 펄스시험과 슬러그시험의 결과를 도시해 보면, 투수성이 낮은 구간에서는 각 시험 결과가 잘 일치하고 있으나 투수량계수가 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이상인 구간에서는 다소 차이를 보이고 있다(Fig. 5). 이는 현장수리시험 방법에 따라 매질의 수리지질특성을 반영하는 공간적인 영역, 즉 각 현장수리시험의 영향 반경의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 펄스시험과 슬러그시험 순서로 수리시험에 의해서 영향을 받는 영역이 커진다. 따라서 투수성이 낮은 경우 수리시험에 영향을 받는 영역이 작아 각 시험에서 유사한 결과가 도출되는 반면, 투수성이 큰 경우 수리시험에 영향을 받는 영역이 공간적으로 확장되기 때문에 대수층에 적용되는 범위가 다른 펄스시험, 슬러그시험에서도 도출되는 수리지질특성이 서로 상이할 수 있는 것이다.

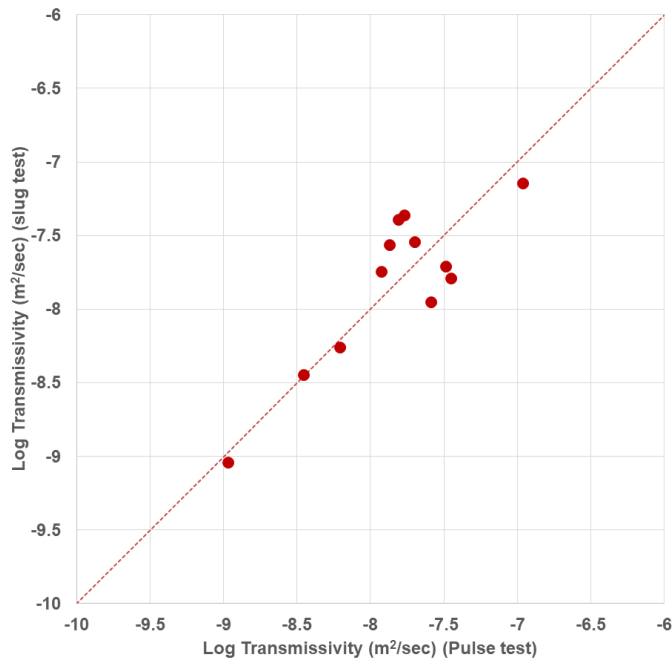


Fig. 5. Comparison of transmissivities from the slug test and pulse test.

펄스시험에 대한 고찰

펄스시험에 소요되는 시간

슬러그시험은 시험구간에 순간적으로 수위변화를 야기한 후 회복되는 지하수위를 관측하는 시험이며, 펄스시험은 시험구간에 적용되는 수리자극이 압력의 형태로 제공되어 수두압의 회복을 관측하는 시험으로 기술하였다. 결과적으로 수리시험에 의한 영향 범위가 작은 펄스시험이 슬러그시험에 비해 시험에 소요되는 시간이 작을 것으로 예상할 수 있다. 이에 BDZ-1 시추공에서 펄스시험과 슬러그시험을 수행한 결과를 각 시험 구간에서 시험 방법별로 소요된 시험시간의 범위를 도시해 보았다(Fig. 6). 펄스시험은 3차례 이상 수행한 소요 시간의 범위를 도시하였고, 슬러그시험도 마찬가지로 시험 구간별로 수행한 시험 시간의 범위를 도시하였는데 시험 시간이 오래 걸리는 경우(Section 10)는 1차례 수행에 소요되는 시간을 도시하였다.

Fig. 6을 살펴보면 BDZ-1 시추공의 각 시험 구간에서 펄스시험은 수리수두가 안정수두로 회복되기 까지 약 수분에서 1시간이 소요되었으며, 슬러그시험은 30분(Section 7, 9)에서 97시간(Section 10)이 소요되었다. 즉, 펄스시험은 1시간 내

에 시험이 종료된 반면, 슬러그시험은 앞서서도 밝혔듯이 시험구간이 갖는 수리수두가 높아 전체 수두의 회복을 관측하지 못하였음에도 불구하고 평균 4.3시간이 소요되었다. 이에 슬러그시험의 최종 완료 시간을 관측된 수위회복 비율과 실제 시험에 소요된 시간에 대한 변수로 구성하여 표준곡선으로 계산한 결과, 최소 4.5시간에서 최대 94일의 시간이 소요될 것으로 예상할 수 있다. 슬러그시험에 소요되는 시간을 종합하면 특히 긴 시간이 소요되는 Section 5(20일)의 구간과 Section 10(94일)의 구간을 제외하고, 전체 구간에서 슬러그시험은 약 1.4일의 시간이 소요되며, 이는 약 30분 내에 시험이 종료되는 펄스시험에 비해 수십 배의 긴 시간이 요구된다는 것을 의미한다.

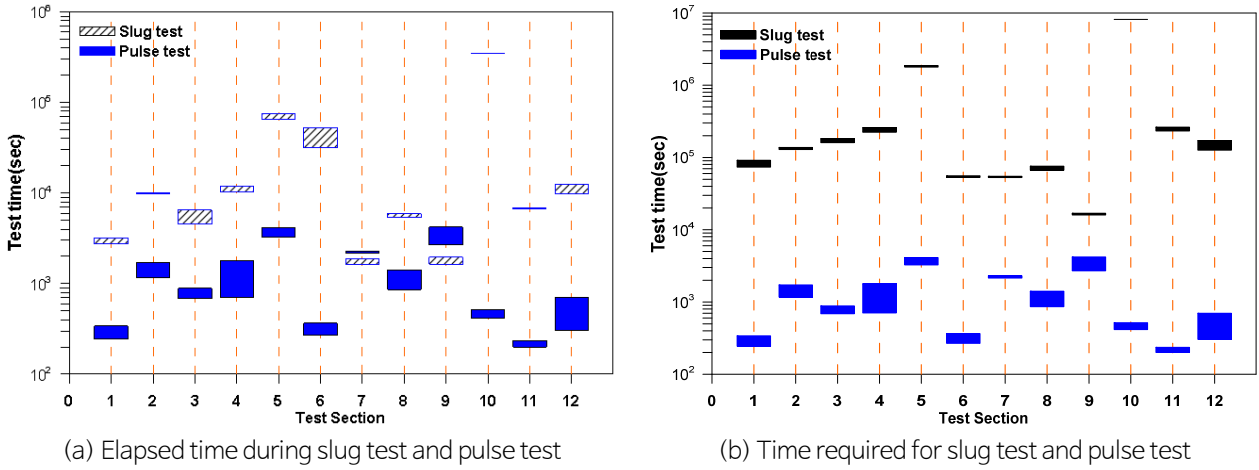


Fig. 6. Time required for slug and pulse tests. The required time for slug test was the estimated value from the function of the elapsed time and the ratio of hydraulic head recovery at that time in (b).

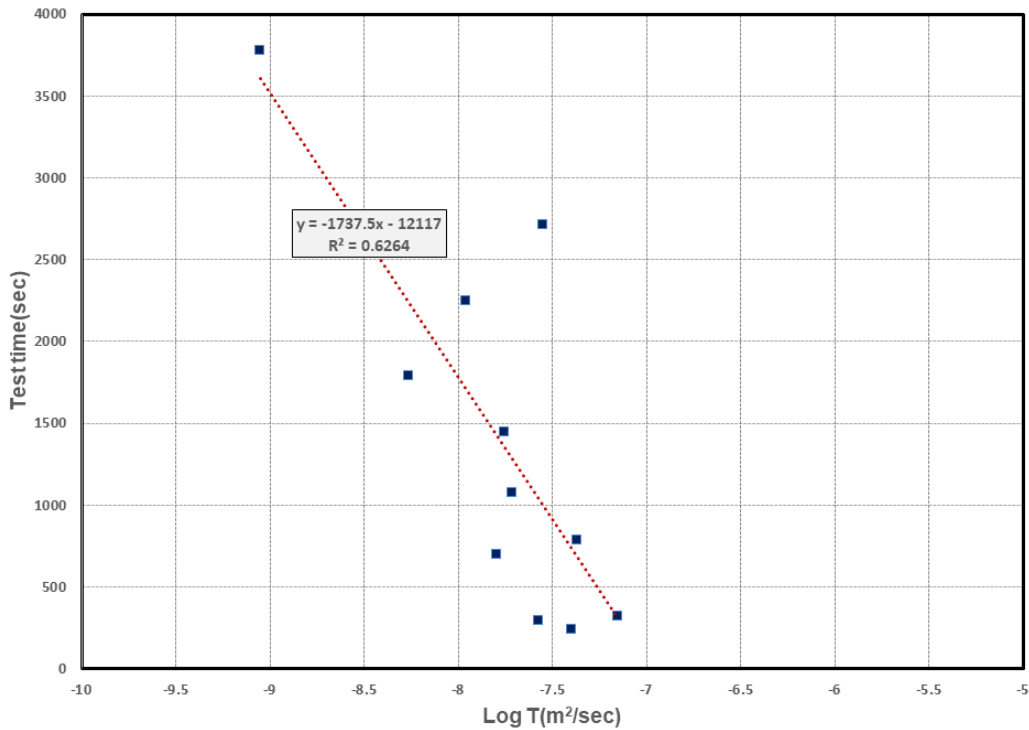


Fig. 7. Logarithmic transmissivity versus test time of pulse test carried out in BDZ-1 borehole.

Walter et al.(2006)은 매질이 갖는 투수성을 기준으로 현장수리시험에 대한 방법을 달리해야 적절한 수리지질특성을 도출할 수 있다고 했다. 특히, 그는 펄스시험은 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 보다 낮은 저투수성 매질에서 수행 가능하며, 슬러그시험은 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 투수량계수를 갖는 매질에서 수행하는 것이 적절한 것으로 제안하고 있다. 이러한 펄스시험에 대한 투수성의 제한성은 BDZ-1에서 실험한 펄스시험의 결과에서도 확인할 수 있었다. 투수성과 시험소요시간의 연관성이 낮은 Section 10을 제외하고 전체 11개 구간에서 수행한 시험결과 투수량계수와 소요시간을 도시한 결과, 시험시간이 “0”에 수렴하여 더 이상 펄스시험이 불가한 투수성을 갖는 영역은 약 $1.07 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상의 구간으로 계산된다. 투수량계수가 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상되는 매질에서 펄스시험을 수행하지는 않았기 때문에 Fig. 7의 결과로 펄스시험의 투수성에 대한 적용 범위를 제안할 수는 없지만, Walter et al.(2006)이 기술한 시험 방법의 제한성에 대해 본 논문의 결과로부터 어느 정도 확인할 수 있었다(Fig. 7).

펄스시험에서 순간 수위변화의 관측

펄스시험시 유의해야할 점은 밸브의 개폐 후 순간적으로 회복되는 수두를 정확히 계측해야 하는 것이다. 압력 센서를 시험장치에 부착하여 수두의 변화를 계측한 결과와 수위계를 이용하여 시험구간의 수두 변화를 계측한 결과가 차이가 날 수 있는데, 이는 압력 센서가 순간적으로 변하는 수두에 대해 초단위로 정밀하게 계측하지 못하는 데서 기인한다고 판단 된다. 일례로 Fig. 8에 BDZ-1 시추공에서 펄스시험 중 Section1, Section2, Section3과 Section4 시험구간의 압력 변화에 대해 센서를 이용하여 계측한 값을 도시하였다. 실제로 Section 1과 Section 2 시험구간에서 밸브의 개폐가 수초 내에 완료되었으며, 이는 압력 센서로 시험구간 내 압력의 순간적 변화를 측정하기에 너무 짧아 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 또한 밸브의 개방이 10초 이상인 Section 3과 Section 4 시험구간에서는 밸브의 개방에 압력 센서로 계측한 압력 변화를 비교적 잘 측정할 수 있었으나, 밸브 개폐시 순간적으로 발생하는 압력 변화에 의해 압력 센서에서 계측의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

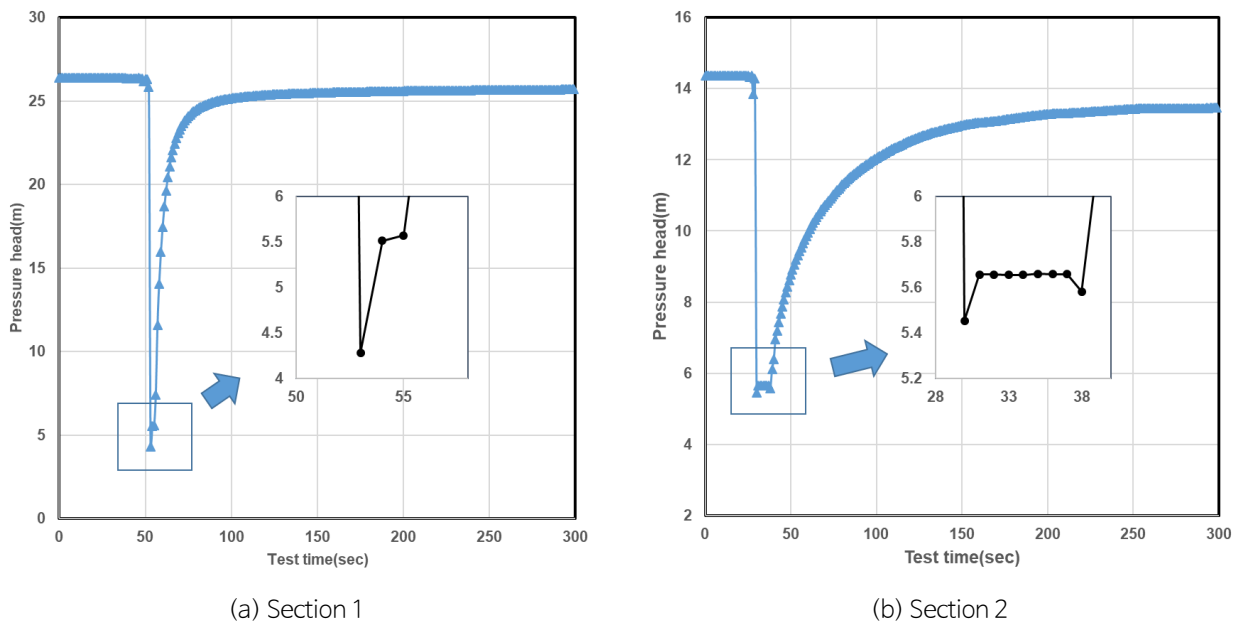
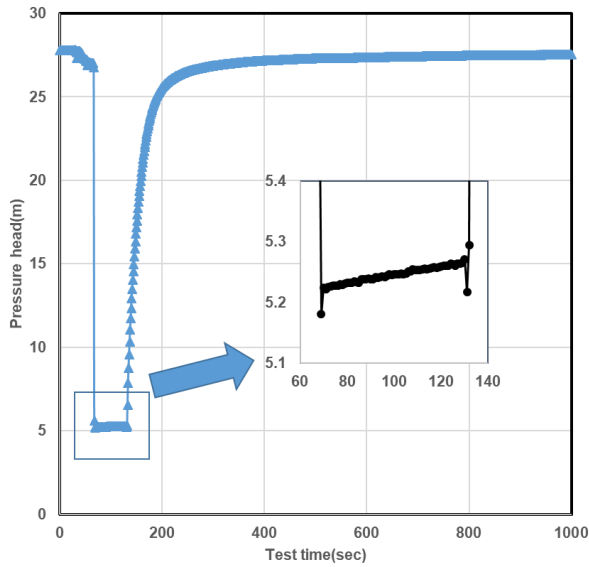
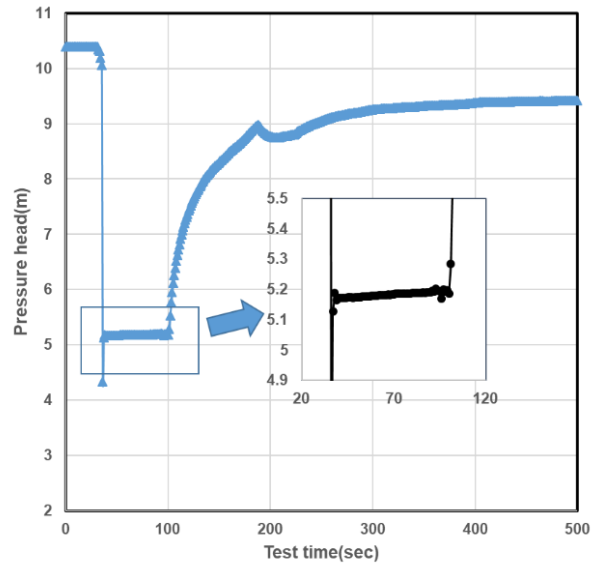


Fig. 8. Variation of pressure head with time in test Section 1, Section2, Section3 and Section 4.



(c) Section 3



(d) Section 4

Fig. 8. Continued.

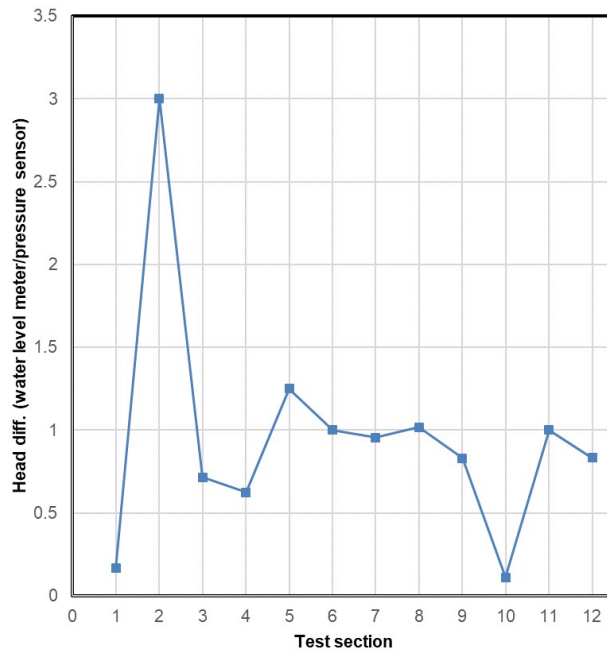


Fig. 9. The variation of pressure head ratio in test zone, which were measured by water level meter and pressure sensor.

펄스시험에서 밸브의 개방과 폐쇄에 따른 수두압의 변화를 정확히 계측하기 위해 압력 센서와 수동수위계를 이용한 압력 측정을 동시에 수행하여 그 결과를 비교해 보았다. Fig. 9에서 도시되는 것처럼 압력 센서와 수동수위계에서 측정한 값은 Section 1, Section 2와 Section 10에서 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 압력 계측의 오차는 펄스시험을 해석할 때 등가반경에 대한 평가 오류로 이어져 결과적으로 투수성을 잘못 해석할 수 있다. 예를 들어 펄스시험을 해석할 때, 2배 큰 순간 압력 변화를 관측했다면 등가반경은 약 1.4배 크게 계산되어 결과적으로 2.4배 큰 투수량계수를 도출할 수 있는

것이다. Forster and Gale(1980)은 실험실 규모에서 하나의 단열이 존재하는 시추코어를 대상으로 수행한 펄스시험의 결과와 정률시험의 결과가 잘 일치하고 있었지만, 실제 시추공에서 현장시험을 통해 도출한 결과는 서로 잘 일치하지 않는다고 하였는데, 그 이유를 시험구간에 가해지는 순간적인 압력에 의해 시험구간 내 주입되는 유체의 부피를 잘 측정할 수 없는데 있다고 밝혔다. 본 논문에서는 해석한 펄스시험의 결과는 정확한 수위 변화를 계측하기 위해 수동수위계를 이용한 결과를 이용하였음을 밝히며, 수동수위계로 정밀하게 수위 변화를 관측할 수 없는 경우 밸브 개방시 압력 센서에서 계측되는 초기 압력 변화와 밸브 폐쇄시 압력 변화를 제외한 값을 이용하는 것이 해석 오차를 줄일 수 있는 방법으로 제안할 수 있다.

결론

KURT 내 굴착된 BDZ-1 시추공에서 수행한 펄스시험의 결과를 요약하고, 저투수성의 결정질 암반에서 펄스시험의 적용성을 평가한 결과는 다음과 같다.

먼저 펄스시험의 결과를 다른 수리시험방법과 비교한 결과, 투수성이 낮은 매질에서는 수리시험의 결과가 잘 일치하고 있다. 그러나 투수량계수가 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이상인 구간에서는 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 현장수리시험 방법에 따라 매질의 수리지질특성을 반영하는 공간적인 영역의 차이로 설명할 수 있다. 일반적으로 펄스시험, 슬러그시험, 정압시험 그리고 정률시험의 순서로 확장되는데 수리시험을 투수성이 낮은 매질에서 한다면 각 시험방법에 의해 영향을 받는 영역이 작아 서로 유사한 결과가 도출될 수 있다. 하지만 투수성이 큰 매질에서 수리시험을 수행할 때 수리적으로 영향을 받는 영역이 공간적으로 확장되기 때문에 도출되는 수리지질특성이 서로 상이할 수 있는 것이다. 아울러 앞서 기술한 바와 같이 펄스시험에 대한 유효 수리반경은 매우 제한적이다. 만약 수리지질특성이 매우 균질한 매질을 대상으로 펄스시험을 수행한다면 펄스시험을 통해 도출한 투수량계수는 전체 암반 매질의 투수성을 반영하겠지만, 단열이 발달하여 수리적으로 공간적인 균질성이 낮은 암반 매질에 대해서는 그렇지 않다. 이는 다른 수리시험방법도 공통적으로 가질 수밖에 없는 한계이지만, 유효 수리반경이 작은 펄스시험의 경우 이로 인해 발생하는 오차는 더욱 클 수밖에 없다.

펄스시험이 작은 유효 수리반경을 갖는다는 단점에도 불구하고 다음과 같은 장점을 갖고 있다. BDZ-1 시추공과 같이 자분하는 시험 구간을 대상으로 슬러그시험을 통해 전체 수위회복을 관측하기 위해서는 지상에서 수직 방향으로 수 미터 혹은 수 십 미터의 수위 관측관을 세워 회복하는 수위를 관측하거나, 만약 그럴 수 없는 환경이라면 초기 지하수위 변화만을 해석에 이용할 수밖에 없어 해석 오차가 발생할 수 있다. 그러나 펄스시험은 시험 구간이 갖는 수두압까지 완전히 회복되는 압력을 관측할 수 있어 수리시험 결과의 해석에 용이하다. 또한, BDZ-1 시추공의 각 시험 구간에서 슬러그시험을 1회 수행할 때, 최소 1일 이상의 시간이 소요되었고, 다시 시험구간의 수리수두 회복을 기다린 후 시험을 재수행하기 까지 많은 시간이 소요된다. 만약 현장수리시험을 수행하는 연구지역이 이동에 용이한 곳에 위치하여 시험시간에 구애받지 않는다면 긴 시간으로 수회의 시험을 수행하여 적절한 수리지질특성을 도출할 수 있지만, 그렇지 않다면 경제적인 여건에 의해 현장시험을 제한할 수밖에 없다. 펄스시험은 시험을 시작한 후 전체 수리수두의 회복을 관측하기 까지 약 수분에서 1시간의 빠른 시간에 시험이 완료되었으며, 그 결과도 다른 시험방법을 이용하여 도출한 결과와 큰 차이가 없었다.

펄스시험에서 특히 유의할 점은 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이상의 투수량계수를 갖는 투수성이 비교적 큰 매질에서는 시험구간의 빠른 수두회복에 의해 펄스시험을 적절한 현장수리시험 방법으로 적용하기 어렵다는 것이다. 아울러 펄스시험에서 밸브의 개폐에 의한 압력 변화를 정확히 관측하기 위해 수동수위계를 이용하는 것이 유리하며, 수동수위계를 이용할 수 없다면 압력 센서에서 계측되는 압력 변화에서 밸브개폐에 의해 순간적으로 변한 압력 값을 제외하여 해석하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법으로 제안할 수 있다.

사사

이 논문은 한국연구재단의 원자력연구개발사업의 지원을 받았음을 밝힌다(NRF-2017M2A8A5014858).

References

- Almén, K.E., Andersson, J.E., Carlsson, L., Hansson, K., Larsson, N.Å., 1986, Hydraulic testing in crystalline rock, A comparative study of single-hole test methods, SKB TR-86-27, SKB, 179p.
- Bouwer, H., Rice, R.C., 1976, A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12(3), 423-428.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S., 1980, A method for determining the hydraulic properties of tight formations, *Water Resources Research*, 16(1), 233-238.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S., 1967, Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Research*, 3(1), 263-269.
- Forster, C.B., Gale, J.E., 1980, Injection versus pressure pulse borehole tests in fractured crystalline rocks-observations and recent experience, *Proceedings of the 3rd Invitational well-testing symposium*, LBL-12076, Berkeley, California, 74-83.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604p.
- 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, 55p.
- IAEA, 1994, *Siting of geological disposal facilities: A safety guide*, Safety Series No. 111-G-4.1, STI/PUB/952, IAEA, 33p.
- IAEA, 1999, *Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste*, Technical Reports Series No. 391, IAEA, 60p.
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Jun, S.C., Cheon, J.Y., Kwon, H.P., 2010, Estimation of hydraulic parameters from slug, single well pumping and step-drawdown tests, *The Journal of Engineering Geology*, 20(2), 203-212 (in Korean with English abstract).
- Johan, A., Johan, B., Sven, F., Eva, H., Jan, H., Jan, H., Marcus, L., Ingvar, R., Carl-Henric, W., 2002, *Testing the methodology for site descriptive modelling*, SKB TR-02-19, SKB, 346p.
- Jun, S.C., Bang, S.H., Lee, C.Y., Yi, M.J., Lee, J.H., 2017, Hydrogeological characterization using pneumatic test and hydraulic test methods in unsaturated fractured rock, *Journal of the Geological Society of Korea*, 53(3), 447-465 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.S., Lee, E.Y., Bae, D.S., Kim, K.S., 1993, Flow dimensional analysis for constant pressure injection test, *The Journal of Engineering Geology*, 3(2), 149-165 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.S., Bae, D.S., Kim, K.S., Koh, Y.K., Song, S.H., 1997, Hydrogeological performance assessment for underground oil storage caverns, *The Journal of Engineering Geology*, 7(3), 229-245 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.S., Kim, C.S., Bae, D.S., Ji, S.H., Yoon, S.T., 2008, Hydrogeological characteristics of the LILW disposal site, *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 6(4), 245-255 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lee, K.K., 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea, *Ground Water*, 37(5), 692-700 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.J., Lee, H.K., 1998, Field measurements and numerical analysis on the efficiency of water curtain boreholes in underground oil storages, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 8(2), 79-86 (in Korean with English abstract).

- Park, K.W., Ko, N.Y., Ji, S.H., 2020, A study on the applicability of the hydraulic test method performed at an underground research facility in crystalline rock, *Economic and Environmental Geology*, 53(2), 121-131 (in Korean with English abstract).
- Walter, S., Arno, T., Hans-Jurg, G., 2006, *Geo-hydraulic Tests in Rock*, 82p.
- Wang, J.S.Y., Narashimhan, J.N., Tsang, C.F., Witherspoon, P.A., 1977, Transient flow in tight fractures, *Proceedings of the Invitational well-testing symposium, Berkeley, California*, 103-116.