

RESEARCH ARTICLE

결정질 암반에서 Moye 방법을 이용한 정압시험의 해석에 대한 고찰

박경우^{1,2} · 박병학³ · 지성훈⁴ · 이강근^{5*}

¹한국원자력연구원 저장처분성능검증부 책임연구원, ²서울대학교 지구환경과학부 박사과정,

³한국원자력연구원 저장처분성능검증부 선임연구원, ⁴한국원자력연구원 저장처분기술개발부 책임연구원,

⁵서울대학교 지구환경과학부 교수

Study on Moye's Method for Analysis of Constant-Head Tests Conducted in Crystalline Rock

Kyung-Woo Park^{1,2} · Byeong-Hak Park³ · Sung-Hoon Ji⁴ · Kang-Kun Lee^{5*}

¹Principal Researcher, Disposal Performance Demonstration R&D Division, Korea Atomic Energy Research Institute

²Ph.D. Student, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

³Senior Researcher, Disposal Performance Demonstration R&D Division, Korea Atomic Energy Research Institute

⁴Principal Researcher, Disposal Safety Evaluation R&D Division, Korea Atomic Energy Research Institute

⁵Professor, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Abstract

Moye's analytical solution was examined as a method for constant-head tests under steady-state conditions, and results were compared with transient-state analyses in *in situ* hydraulic tests. The sensitivity of hydraulic conductivities calculated using Moye's method increased with the length of the test section, which should be as large as possible under test conditions. Particularly in low-permeability media with less than 10^{-8} m/sec of hydraulic conductivity, hydraulic conductivity is lower than that under transient-state conditions and can be recalculated by adjusting the boundary between radial and spherical flow assumed in Moye's equation. Constant-head tests performed in the research bore-hole at the KAERI Underground Research Tunnel (KURT) indicated that transmissivities derived from the constant-head withdrawal test under transient-state conditions in low-permeability media were higher than those derived from steady-state tests, likely because the groundwater flow boundary was smaller than the "half of the test-section length" assumed by Moye's equation. When interpreting constant-head test results for crystalline rock, the hydrogeological properties of the medium may be better understood by considering assumed conditions accompanying analysis of the steady-state condition and comparing them with results for the transient-state analysis, rather than simply assuming properties based on steady-state analyses.

Keywords: constant-head test, Moye's formula, KURT, radial flow, spherical flow

 OPEN ACCESS

*Corresponding author: Kang-Kun Lee
E-mail: kklee@snu.ac.kr

Received: 30 October, 2023

Revised: 4 December, 2023

Accepted: 5 December, 2023

© 2023 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 정류 상태의 정압시험에 대한 해석 방법 중 Moye 해석해를 고찰해 보았으며, 현장수리시험에서 정압시험에 대한 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석에 대해 비교해 보았다. Moye 해석해로 산출한 수리전도도는 시험 구간의 크기가 작을수록 민감도가 커지기 때문에 시험 구간의 길이를 가능한 시험 조건에서 크게 설정하여 현장수리시험을 수행하는 것이 바람직하다. 특히 10^{-8} m/sec 이하의 수리전도도를 갖는 저투수성 매질에서는 부정류 상태의 해석 결과에 비해 Moye 해석해로 도출한 수리전도도의 값이 작게 도출되는데, 이는 Moye 식에서 가정한 방사성 흐름과 구상 흐름의 경계면을 조정할 경우 보완할 수 있었다. KURT내 연구용 시험공에서 수행한 정압시험 결과, 저투수성 매질에서 부정류 상태의 시험을 통해 도출한 투수성이 정류 상태의 결과에 비해 큰 값이 도출되었다. 이는 정압시험에 의해 형성되는 방사상 흐름에서 구상 흐름으로 바뀌는 지하수 흐름의 경계면이 Moye 식에서 가정한 ‘시험구간 길이의 절반’보다 작게 형성되었기 때문으로 판단되며, 결국 결정질 암반에서 수행한 정압시험을 해석할 때 단순히 정류 상태의 해석으로 매질의 수리지질특성을 판단하기보다는 정류 상태의 해석에서 수반되는 가정 조건을 고려하여 부정류 상태의 시험 결과와 함께 비교하여 해석한다면 매질의 수리지질특성을 보다 잘 이해할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 정압시험, Moye 해석해, KURT, 방사성 흐름, 구상 흐름

서 론

지하수 유동이나 용질이동 특성을 규명하기 위해서는 지하수가 흐르는 대수층의 수리지질특성을 파악하는 현장수리 시험이 선행되어야 한다. 일반적으로 투수성이 높은 충적층 대수층에서는 양수시험을, 투수성이 낮은 암반 매질에서는 순간충격시험을 이용하여 매질의 수리지질특성에 대한 정보를 얻고 있으며, 추적자 시험으로 용질이동 특성을 파악하고 있다(Freeze and Cherry, 1979). 한편, 나공상태에서 수행되는 순간충격시험과 양수시험은 고투수성의 상부 충적층으로 인해 단열대가 발달된 결정질 암반에 대한 수리지질특성을 도출해 내는데 한계가 있다. 따라서 패커를 이용해 시험구간을 수리적으로 격리한 후 구간별 순간충격시험, 양수시험, 정압시험으로 결정질 암반의 수리지질특성을 도출하고 있다(Almén et al., 1986). Almén et al.(1986)은 결정질 암반에 적용할 수 있는 여러 형태의 수리시험 방법을 정률시험, 정압시험, 순간충격시험의 세 가지로 구분하여 소개하고 있으며, 이들 중 수리전도도를 추정함에 있어 비교적 정확하고 다른 수리시험에 비해 간편한 방법으로 정압시험을 추천하고 있다. 특히, 저투수성 단열암반의 수리특성을 파악하기 위해서는 정압시험과 정압시험 후 수위회복시험을 연계하여 수리지질특성을 도출하는 것이 가장 적합하며, 정압시험과 수위회복시험의 시험 시간은 최소한 2시간을 초과해야 한다고 제안했다(Almén et al., 1986).

정압시험(constant-head test)은 국내에서도 지질공학 분야에서 매질의 투수성을 추정하기 위해 널리 사용되는 수리시험방법으로 단일패커나 이중패커를 이용하여 시험 구간을 수리적으로 격리하고, 격리된 구간에 일정한 압력으로 물을 주입하거나 양수하여 유입되거나 배출되는 유량을 관측함으로써 투수량계수를 산출할 수 있다. 정압시험 중 주입시험이 결정질 암반에서 자분하지 않는 시험 구간을 대상으로 사용할 수 있지만 정압을 유지하기 위한 특수한 기기가 필요하고, 시험 구간으로 유입되는 유량을 정확히 관측해야 하는 어려움이 있다(Kim et al., 1993). 반대로 배출시험은 피압대수층을 대상으로 자분하는 시험 구간에서 적용할 수 있으며, 시험 구간의 수리수두가 지표보다 높아 자분하는 대수층에서 압력을 제거하게 되면 시험 구간내 지하수가 지표로 배출이 되며, 이 때 배출되는 지하수의 유량을 관측함으로써 매질의 수리지질특성을 도출할 수 있다. 정압시험을 해석하기 위해 다양한 방법이 제안되었으며, 시간별 지하수 유입량이나 배출량을 구하여 매질의 투수성을 파악하는 부정류 상태의 해석(Jacob and Lohman, 1952)과 지속적으로 매질내 물을 주입하거나 배출한 후 일정한 값을 갖도록 충분한 시간이 경과된 후에 주입/배출되는 물의 양을 이용하는 정류 상태의 해석이 가능하다(Moye, 1967; Dagan, 1979). 그러나 실제 자연계에서 발생하는 정류 상태의 지하수 흐름은 현장수리시험 중에 좀처럼

발견할 수 없으며, 대수층에 변화를 준 후 일정한 시간이 경과하면 준정류 상태(quasi-steady-state condition)에 도달할 수 있다(Snow, 1965). 일반적으로 이런 준정류 상태를 정류 상태로 가정하여 수리지질특성을 도출하는데, 이는 정류 상태의 지하수 유동을 해석하는 방법이 수학적으로 간단하며 지하수의 부정류 상태의 분석과도 비교적 잘 일치되고 있기 때문이다(Snow, 1965).

한편, 정압시험에서 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석을 비교한 결과, 정류 상태의 결과가 부정류 상태의 결과에 비해 다소 크다고 알려져 있다. Andersson and Persson(1985)은 스웨덴의 결정질 암반을 대상으로 3개의 다른 지역에서 수행한 수 백회의 정압주입시험 결과를 이용하여 정류 상태와 부정류 상태의 시험에서 산출된 수리전도도를 비교하였으며, 정류 상태에서 측정된 평균 수리전도도가 부정류 상태의 해석 결과에 비해 약 2.7배 크게 산출되었고, 때로는 10배 이상의 큰 결과를 나타내기도 한다고 하였다(Andersson and Persson, 1985). 국내의 연구 결과에서도 Moye 방법을 이용한 정류 상태의 해석 결과가 지하수 유동 차원 해석을 통한 부정류 상태의 결과에 비해 2에서 3배 큰 결과가 도출된다고 보고하고 있다(Kim et al., 1993). 그러나, 일부 연구에서는 부정류 상태의 해석 결과가 오히려 크게 산출된다고 보고하고 있는데, Kim et al.(2002)는 $1\text{E}-8 \text{ m/sec}$ 의 수리전도도를 기준으로 이보다 낮은 저투수성 매질의 경우 부정류 상태의 해석 결과가 오히려 큰 값을 가지는 것으로 평가하였으며(Kim et al., 2002), 이러한 결과는 앞서 기술한 Andersson and Persson(1985)이 발표한 수 백회의 정압주입시험 결과에서 수리전도도가 $1\text{E}-8 \text{ m/sec}$ 이하이고, 2차원 흐름(radial flow pattern) 이상의 유동 차원을 갖고 있는 일부 시험 구간의 경우, 정류 상태의 시험 결과에 비해 부정류 상태에서 산출되는 수리전도도가 크게 해석되는 결과와 부합된다(Andersson and Persson, 1985). 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석에서 발생하는 오차에 대해 기존의 연구자들은 지하수 흐름에 대한 가정과 수리적인 경계에 대한 영향으로 인해 발생하며 (Andersson and Persson, 1985), 특히 정압주입시험을 수행할 때 시추공벽 효과를 무시하였기 때문인 것으로 분석하였다(Cinco-Ley and Samaniego-V, 1981). 이상의 연구 결과는 정압시험에서 정류상태의 해석 결과가 부정류 상태의 해석 결과에 비해 다소 큰 값이 도출되었지만, 수리전도도가 $1\text{E}-8 \text{ m/sec}$ 이하인 저투수성 매질에서는 부정류 상태의 해석 결과가 정류 상태의 해석 결과에 비해 오히려 큰 값이 도출되는 것으로 요약할 수 있다.

본 논문에서는 정압시험의 정류 상태 지하수 흐름을 해석하기 위해 일반적으로 이용되는 Moye(1967)의 방법으로 지하수 유동에 대한 경계의 범위를 고찰해 봄으로써 정류 상태의 해석이 갖는 불확실성을 분석해 보았다(Moye, 1967). 그리고 정류 상태의 정압시험의 결과와 정류 상태에 이르기까지 시험 구간에서 배출되는 지하수의 시간별 유량을 관측하여 해석한 부정류 상태의 시험 결과를 서로 비교하여 지하수 유동 차원의 경계 범위를 추론하고 단열이 발달한 결정질 암반에서 수행한 정압시험을 해석할 때 유의할 점에 대해 논의해 보았다.

정류상 지하수 흐름에서 정압시험 해석법

Moye의 해석법

정류 상태의 조건에서 정압시험을 해석하기 위해 기존의 연구자들은 정압시험의 영향 반경(radius of influence)를 가정하였는데(Snow, 1965; Moye, 1967; Ziegler, 1976), 이 영향 반경은 시험구간의 지하수의 흐름이 2차원에서 3차원 흐름으로 바뀌는 경계면으로 정의할 수 있다. Moye는 시험 구간의 크기의 절반인 거리에서 경계면이 형성된다고 하였으며, Snow와 Ziegler는 시험 구간과 같은 거리에서 경계면이 형성된다고 가정하고 Darcy의 방정식을 이용하여 해를 구하였다. 정류 상태의 정압시험에 대한 해석 방법으로 널리 이용되는 Moye의 해석해는 시험 구간의 암반이 균질(homogeneous)하고 등방성(isotropic)의 투수성을 갖는 매질을 가정한다(Moye, 1967). 비록, 정압시험에 대해 Darcy의 법칙에 대한 수치

해를 제시한 Dagan의 해석 방법이 이론적인 근거를 갖고 있다고 할 수 있으나(Dagan, 1979), 현재 국내에서 결정질 암반에 수행한 정압시험을 해석할 때 주로 Moye의 방법을 주로 사용하고 있으며 Moye의 방법을 통해 해석한 결과가 Dagan의 해석법에 비해 조금 과하게 평가될 수 있으나, 불균질한 등방성의 수리특성을 갖는 매질에서도 비교적 수리지질특성을 잘 반영하고 있다(Braester, 1982). 그리고 현재까지 단열 암반 매질에서의 지하수 유동을 명확히 설명할 수 있는 이론적 바탕이 제시되지 못하고 있는 가운데(de Marsily et al., 2005; Neuman, 2005), 결정질 암반을 대상으로 수행한 정압시험에 대해 등방성의 균질한 수리지질특성을 가정하여 해석하는 것은 일반적으로 접근 가능한 방법이라고 할 수 있으므로 본 논문에서는 정류 상태의 정압시험 해석에 Moye의 해석법을 이용하였다.

정류 상태의 정압시험을 해석한 Moye의 해석법을 간단히 설명하면 다음과 같다(Fig. 1). 먼저, 원통좌표계를 이용했을 때, 수두 구배를 $-dh/dr$ 라고 두면 단위 면적당 흐르는 임의의 지점(r)에서 지하수의 유량은 Darcy의 법칙에 따라 ' $Hydraulic conductivity(K) \times dh/dr$ '로 정의할 수 있다. 시험 구간의 길이(l)가 시추공의 직경에 비해 충분히 크면 시험 구간에 인접한 매질에서 지하수의 흐름은 2차원 흐름으로 가정할 수 있다. 즉, 시추공을 하나의 원기둥으로 가정하면 지름 r_0 을 갖는 원기둥의 중심축에서 임의의 r 지점에서의 단위면적당 지하수의 흐름은 $q/2\pi rl$ 이며, 따라서 식 (1)로 정리할 수 있다.

$$K \frac{dh}{dr} = - \frac{q}{2\pi rl} \quad (1)$$

$$h - h_0 = - \int_{r_0}^r \frac{q}{2\pi Krl} dr = - \frac{q}{2\pi Kl} \log \frac{r}{r_0}$$

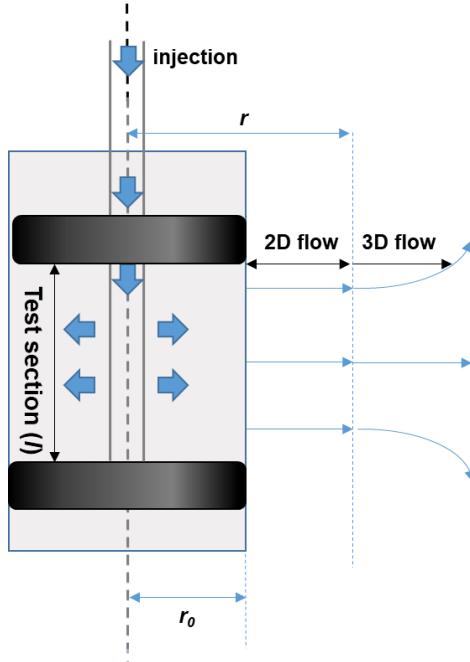


Fig. 1. Schematic diagram of the constant-head injection test in Moye's method.

시험 구간에서 상대적으로 이격된 지점(Fig. 1의 r)에서 지하수는 2차원 방사상의 흐름이 아닌 3차원의 구상흐름으로 바뀌게 된다. 이 때 임의의 r 에 대한 구상 표면에서 단위면적당 지하수의 흐름은 $q/4\pi r^2$ 이며, 따라서 식 (2)로 정리할 수 있다.

$$K \frac{dh}{dr} = -\frac{q}{4\pi r^2}$$

$$h = - \int_{\infty}^r \frac{q}{4\pi K r^2} dr = \frac{q}{4\pi K r}$$
(2)

만약, 시험 구간에서 r 만큼 이격되었을 때, 지하수의 흐름이 2차원의 방사상흐름과 3차원 구상흐름의 경계가 된다면, 식(1)과 식(2)에서 식(3)으로 정리할 수 있다.

$$h_0 = \frac{q}{4\pi Kr} + \frac{q}{2\pi Kl} \log \frac{r}{r_0}$$
(3)

Moye는 시험 구간에서 매질로 유입되는 물의 흐름이 방사상유동에서 구상유동으로 변하는 경계를 가정함으로서 결과를 산출하였는데, 그는 2차원과 3차원 흐름의 경계면이 시험 구간 길이의 절반인 거리에서 ($l=2r$) 형성된다고 가정하였으며, 다음 식(4)과 같은 수리전도도 도출 식을 유도하였다.

$$K = \frac{q}{2\pi h_0 l} \left(1 + \log \frac{l}{2r_0} \right)$$
(4)

여기서, q 는 시험구간에 매질로 유입되는 유량이며, h_0 는 정압시험시 시험구간에 가해주는 압력이다.

Moye의 해석해 적용시 유의점

Kuusela-Lahtinen et al.(2003)은 핀란드의 로무바라(당시 방사성폐기물처분장의 한 후보부지) 지역에서 10 m와 2 m의 시험 구간을 설정하고 수행한 정압주입시험 결과, 시험 구간의 크기에 따라 지하수의 유동 차원이 변하였다고 기술하였다(Kuusela-Lahtinen et al., 2003). 그는 Barker(1988)가 제안한 GRF(Generalized Radial Flow) 모델을 이용해 시험 결과를 해석하였는데(Barker, 1988), 2 m의 시험 구간에서 수행한 정압시험 결과에 비해 10 m 시험 구간의 결과에서 저차원($n < 1.5$)의 흐름이 많이 발견되었다고 하였으며, 특히 저투수성을 갖는 심부 영역에서 시험 구간의 크기에 따라 다른 형태의 지하수 유동 차원을 보인다고 하였다. 이 연구 결과는 결정질 암반에서 지하수가 일부 단열에서만 선택적으로 흐르고 있으며(Berkowitz et al., 2000; Bour et al., 2002), 따라서 정압시험의 시험 구간 길이에 따라 지하수의 유동에 대한 차원이 바뀔 수 있음을 제시하는 바로, 결정질 암반에서 수행하는 Moye's method를 이용하여 정압시험을 해석할 때 2차원 흐름과 3차원 흐름의 경계면이 시험 구간 길이의 절반인 거리($l=2r$)에서 형성된다는 가정을 시험 구간의 크기에 따라 달라질 수 있음을 의미한다.

이에 본 연구에서는 시험 구간의 길이에 따라 방사성 유동과 구상 유동의 경계면까지의 거리에 대한 가정을 조정하는 계산을 수행하였다. 계산에 이용한 조건은 NX 규격의 시추공에서 10 m 길이의 시추공 시험구간에 일정한 수두로 가압한 정압주입시험을 수행했을 때 시험 구간에 주입되는 유량이 1 liter/min인 경우를 가정하였으며, 시험 구간의 크기를 1 m, 5 m, 10 m, 그리고 20 m로 달리했을 때 도출되는 수리전도도에 대해 Moye의 해석에서 사용한 $l=2r$ 의 조건을 기준치로 사용하였다. 그리고, $|l/r| > 0.1$ 에서 10까지 변할 때 도출되는 수리전도도의 값에 나누어 그 결과를 도시하였다(Fig. 2).

Fig. 2에서 보는 바와 같이 $l=2r$ 일 때 도출되는 수리전도도가 가장 작으며, $l=2r$ 보다 작거나 큰 경우 보다 큰 수리전도

도를 도출할 수 있다. 예를 들어 단열면을 가진 시험구간에서 정압시험을 수행할 경우 지하수 흐름의 경계면(r)이 시험 구간 길이의 1/2보다 확장되어($r > l/2$), Moye 해석해 보다 큰 수리전도도를 가질 수 있다. 반대로 저투수성 매질에서 시험 구간 길이의 1/2($l = 2r$) 보다 작은 영역에서 지하수 흐름의 경계면이 형성된다면($r < l/2$), 또한 Moye 해석해 보다 큰 수리 전도도를 가질 수 있다. 결과적으로 단열면이 발달하여 지하수 흐름의 경계면이 확장되거나, 저투수성 매질을 대상으로 정 압시험을 수행할 경우 Moye의 가정을 통해 정류 상태의 정압시험을 해석한 결과는 과소 평가될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Fig. 2를 살펴보면 시험 구간의 크기가 작을수록 지하수 흐름 차원의 경계면까지의 거리에 대한 민감도가 커지게 되므로 정압시험 수행시 시험 구간의 크기가 작을 경우 해석에 유의해야 함을 알 수 있다.

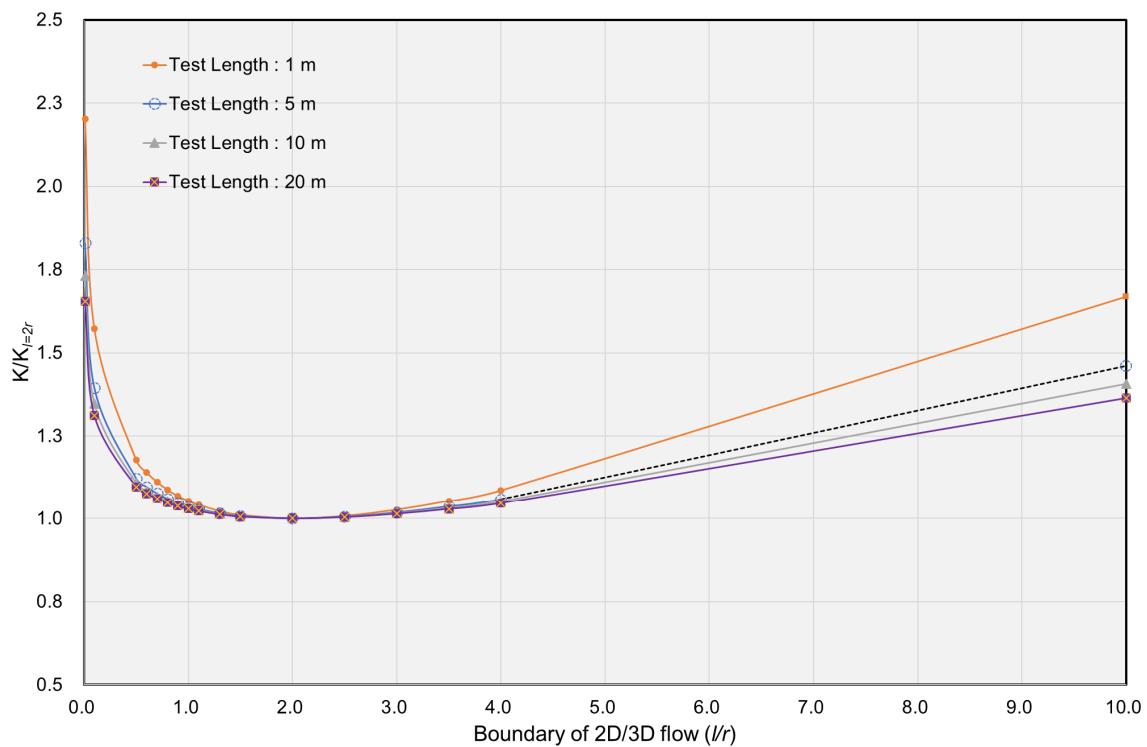


Fig. 2. Calculated hydraulic conductivities for different distances to the boundary where the flow dimension changes from radial to spherical flow. Test sections were 1, 5, 10, and 20 m long.

정압시험 결과

한국원자력연구원은 방사성폐기물의 심층처분 연구를 위해 2007년 2개의 연구 모듈을 갖는 KURT(KAERI Under-ground Research Tunnel)를 건설하였으며, 이후 2014년에 4개의 연구모듈을 추가로 건설하여 KURT를 확장하였다. 본 연구는 KURT내 제 6 연구모듈에 굴착된 BDZ-1 시험공을 이용하였는데, BDZ-1 시험공은 KURT의 바닥면에서 Casing 이 없이 20 m의 심도로 굴착되어 있으며, 시험공의 최상부가 KURT의 바닥면과 동일한 해발고도(80 m, EL.)를 갖고 있다 (Fig. 3)(Park et al., 2019). BDZ-1 시험공에서 1.45 m의 시험 구간의 길이를 갖도록 이중페커를 설계하였고, 20 m의 길이를 전체 12개의 시험 구간으로 구분하여 현장시험을 수행하였다. 현장시험을 위해 먼저 이중페커를 이용해 시험 구간을 수리적으로 격리한 상태에서 안정 수리수두를 측정한 후, KURT 바닥면보다 1 m 이상 수두가 높아 배출시험이 가능한 구간 9개를 선정하여 정압시험을 수행하였다(Table 1). 본 연구의 정압배출시험은 자분하는 시험 구간을 대상으로 수행하

였기 때문에 초기 시추공 저류효과에 대한 오차를 최소화 할 수 있다. 그리고 정류 상태에 도달하였다고 판단되는 시점에서 시험 구간에서 배출되는 유량을 측정하였기 때문에 저투수성 매질에서 배출되는 적은 유량도 관측할 수 있는 장점을 가진다. 결과적으로 기존의 연구 결과에서 제시한 시추공 저류효과로 인해 발생하는 오차와 저투수성 매질의 유량 측정에 대한 오차를 고려하지 않아도 되므로(Cinco-Ley and Samaniego-V, 1981; Kim et al., 1993), 정압시험이 기존의 시험에 비해 보다 정확하게 수행되었다고 판단된다.

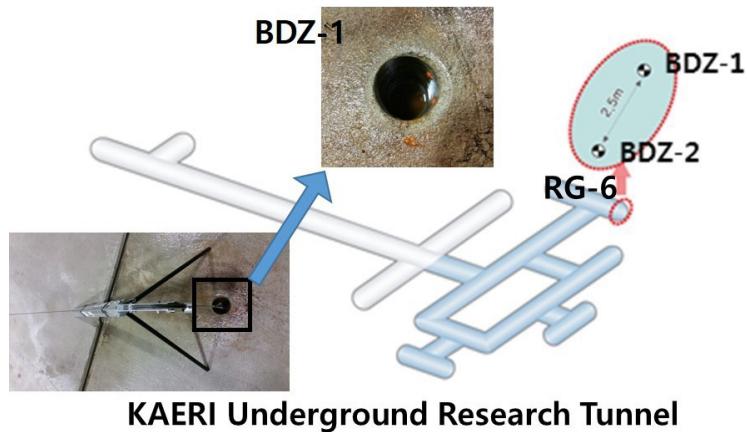


Fig. 3. Location of the BDZ-1 borehole. BDZ boreholes are in the 6 RG Research Gallery. The elevation of the top of the casing of BDZ-1 was the same as that of the bottom KURT surface.

Table 1. Test sections of the BDZ-1 borehole (Hydraulic heads were measured immediately before the constant-head test in each test section)

Test section	Test interval in the BDZ-1 (m, depth from the KURT surface)		Hydraulic head (m, E.L.)	
	From	To		
Section 1	18.00	19.45	101.34	
Section 2	16.55	18.00	89.38	
Section 3	15.10	16.55	102.87	
Section 4	13.65	15.10	99.85	
Section 5	12.20	13.65	104.77	
Section 6	10.75	12.20	81.09	
Section 7	9.30	10.75	105.02	
Section 8	7.85	9.30	90.19	
Section 9	6.40	7.85	86.31	
Section 10	4.95	6.40	80.57	
Section 11	3.50	4.95	91.66	
Section 12	2.05	3.50	80.46	

상세한 현장수리시험 수행 내용 및 절차는 Park et al.(2020)을 참조로 한다(Park et al., 2020).

BDZ-1시험공에서 수행한 정압배출시험의 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2에서와 같이 시험 구간별 투수량계수는 매우 불규칙적으로 분포를 보이고 있어 시험 구간의 투수성이 시험 구간내 존재하는 투수성 단열의 여부에 따라 좌우하는 전형적인 결정질 암반의 수리지질특성을 나타낸다고 판단된다. 이러한 결과는 Table 1의 시험 구간별 수리수두를 도시한 결과에 대해서도 같은 맥락으로 설명할 수 있는데, KURT의 바닥면과 가까운 Section 12부터 가장 먼 Section 1까지 전체 19.45m의 길이에서 관측한 수리수두는 선형으로 증가하지 않고 불규칙한 분포 양상을 보이고 있다. 즉, 수리수두에 심도별 분포 결과 또한 다공성 매질에서의 수리특성이 아니라 지하수의 흐름이 단열계에 의해 지배되는 결정질 암반의 수리특성을 의미한다.

Table 2. Transmissivity estimated using the constant-head withdrawal test in the BDZ-1 borehole

	Transmissivity ($m^2 s^{-1}$)		
	Steady-state analysis		Transient-state analysis
	Moye (1967)	Jacob and Lohman (1952)	Jacob and Lohman (1952)
Section 1	1.88E-08	5.44E-08	2.68E-08
Section 2	1.53E-08	6.51E-08	6.06E-08
Section 3	7.29E-09	1.67E-08	1.46E-08
Section 4	6.04E-09	7.78E-09	7.07E-09
Section 5	7.76E-10	9.22E-10	1.54E-09
Section 6	-	-	-
Section 7	2.66E-08	2.06E-08	3.37E-08
Section 8	2.49E-08	2.43E-08	2.14E-08
Section 9	8.20E-08	6.23E-08	6.67E-08
Section 10	-	-	-
Section 11	4.78E-09	1.05E-08	1.06E-08
Section 12	-	-	-
Mean	1.11E-08	1.73E-08	1.72E-08

정압배출시험 결과, Moye의 방법을 이용한 정류 상태의 해석으로 도출한 시험 구간의 평균 투수량계수는 $1.11E-8 m^2/sec$ 이며, Jacob and Lohman의 방법을 이용한 부정류 상태의 해석으로 표준곡선중첩법은 $1.73E-8 m^2/sec$, 직선법은 $1.72E-8 m^2/sec$ 의 투수량계수를 도출할 수 있었다(Jacob and Lohman, 1952). 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석 결과는 큰 차이를 보이고 있지는 않으며, 부정류 상태의 해석 결과가 다소 큰 평균값으로 도출되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4). 한편, Table 2에서 확인되는 바와 같이 $2.0E-8 m^2/sec$ 보다 작은 투수성을 갖는 매질에서는 정류 상태의 해석 결과가 부정류 상태의 해석 결과에 비해 작으며, $2.0E-8 m^2/sec$ 보다 큰 투수성을 갖는 매질에서는 정류 상태의 해석 결과가 오히려 큰 것을 확인할 수 있다. 각 시험구간에 대한 크기가 1.45 m로 설정된 현장시험 결과이기 때문에 본 연구의 결과는 $1E-8 m/sec$ 이하의 수리전도도를 갖는 매질에서 부정류상태의 해석 결과가 정류 상태의 해석 결과 보다 크게 산출된다는 Kim et al.(2002), Andersson and Persson(1985)의 해석 결과와 잘 부합된다.

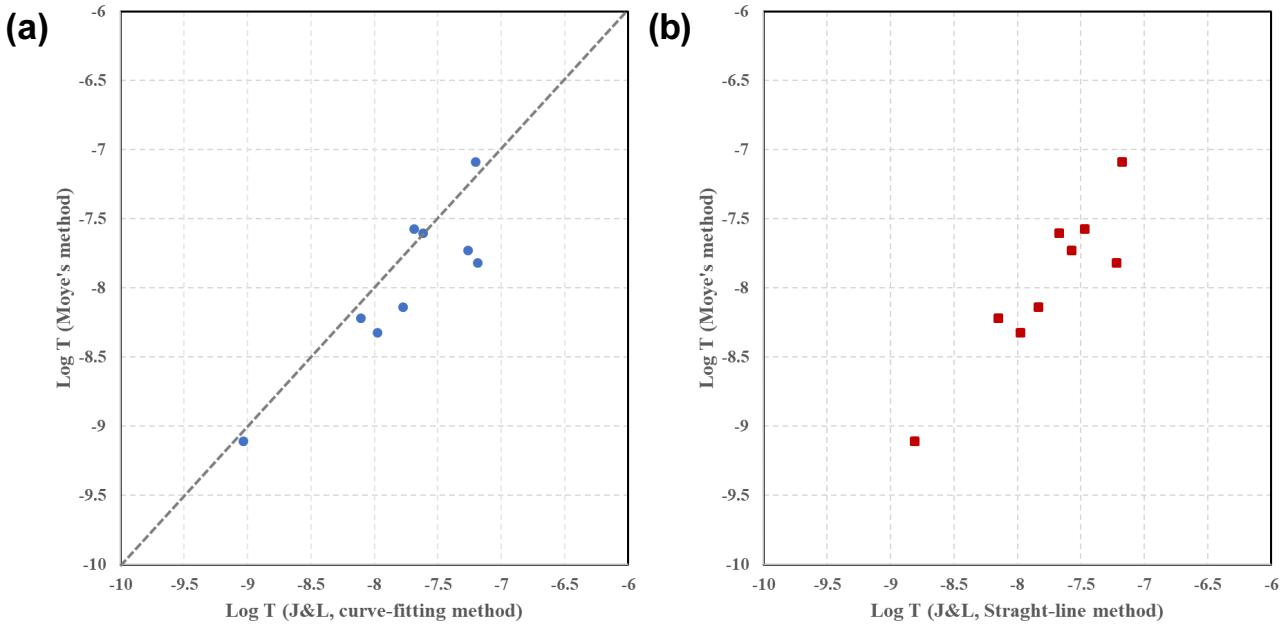


Fig. 4. Logarithmic transmissivities obtained from steady-state and transient-state test: (a) Log T from Moye's method vs Log T from Jacob and Lohman's curve-fitting method, (b) Log T from Moye's method vs Log T from Jacob and Lohman's straight-line method (Jacob and Lohman, 1952; Moye, 1967).

한편, Doe and Remer(1981)는 결정질 암반에서 정류 및 부정류 상태의 정압시험으로 도출한 투수량계수를 이론적으로 비교하였는데, 저투수성 매질의 경우 정류 상태의 해석 결과에서 오차의 범위가 증가한다고 하였다. 이에 대해 그들은 정압시험의 소요 시간을 더 길게 하거나, 정압시험에 의한 영향 반경(radius of influence)를 조절한다면 정류 상태의 해석에서 발생하는 오차를 줄일 수 있다고 하였다(Doe and Remer, 1981). 본 연구 결과 BDZ-1에서 수행한 정압시험을 살펴보면, 2.0E-8 m²/sec보다 작은 저투수성 매질에서 부정류 상태의 해석 결과가 정류 상태의 해석 결과에 비해 큰 값을

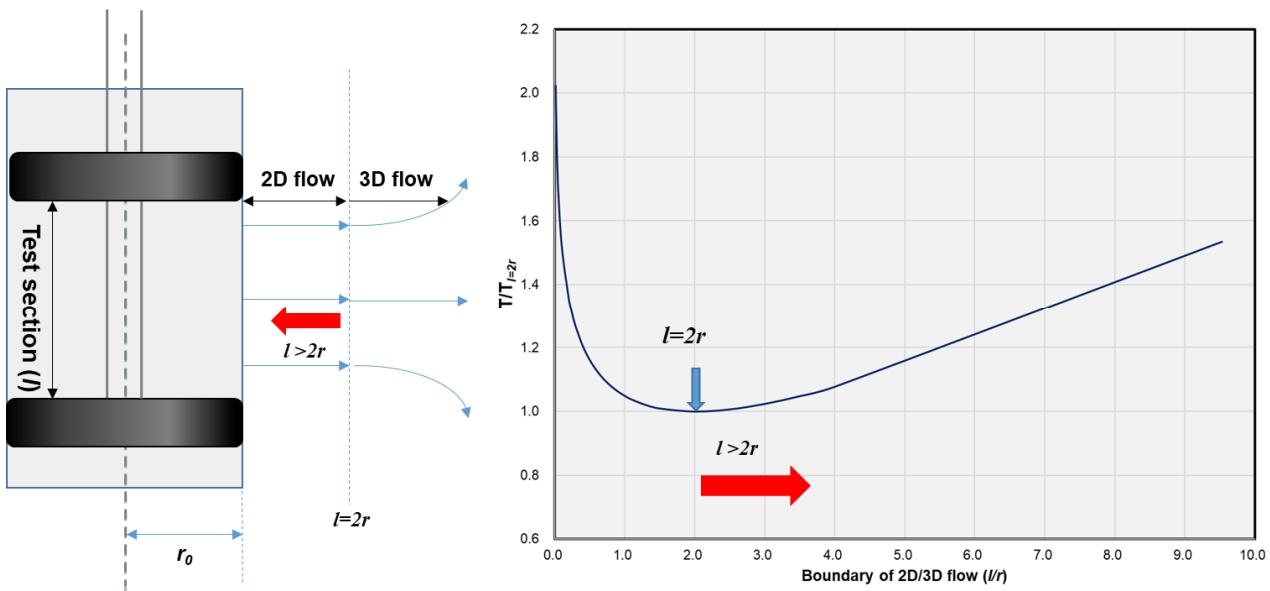


Fig. 5. Effect of changing the radial and spherical flow boundary to $l > 2r$ during the constant-head test.

보이고 있다. 따라서, Doe and Remer(1981)가 제안한 오차를 줄이는 방법에 따라 방사상 유동과 구상 유동의 경계면(r)에 대한 크기를 조절하는 방법을 이용해 보았다(Doe and Remer, 1981). 정류 상태의 해석해로 정압시험을 해석할 때, 시험 구간 길이(l)의 절반에서 지하수 흐름 차원의 경계면이 형성되는 된다는 가정을 이용하므로 정압시험에 의한 영향반경은 ‘시험구간 길이(l)의 절반’으로 고려하였다. 만약 이보다 작은 크기에서 지하수 흐름 차원의 경계면이 형성된다고 가정했을 때, 정류 상태의 해석 결과는 커지게 되어 부정류 상태의 해석 결과와 유사하게 근사시킬 수 있을 것이다(Fig. 5).

Moye의 해석해를 이용해 1.45 m의 시험 구간에 대한 정압배출시험 결과로 영향 반경을 계산하면 $l = 2r$ 인 지점($r = 0.725$ m)에서 정압시험의 경계조건이 형성되게 되는데, 저투수성 매질의 경우 이보다 작은 범위에서 경계조건이 형성될 수 있어 Fig. 4에서 $l > 2r$ 보다 큰 값을 가지게 되어 도출되는 투수량계수는 이보다 크게 된다(Fig. 5). 결국 결정질 암반에서 정압시험을 해석할 때, 정류 상태의 Moye 해석해를 이용한 결과로서 매질의 수리지질특성을 판단하기보다는 단열 빈도가 낮은 저투수성 매질에서는 지하수 흐름의 경계면이 시험공 주변에서 형성될 수 있으므로 부정류 상태의 시험 결과가 더 매질의 투수성을 반영할 수 있다고 판단된다.

결 론

본 연구에서는 정압시험에 대한 해석으로 정류 상태 시험에 대해 흔히 사용하고 있는 Moye의 해석해에 대해 고찰해 보았으며, KURT내 연구용 시험공에서 수행한 정압배출시험에서 시간에 따라 배출되는 지하수의 유량을 관측한 부정류 상태의 자료와 24시간 이상 지하수의 배출을 유도한 후 배출되는 최종 유량을 관측한 정류 상태의 자료를 활용하여 도출한 투수량계수를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Moye의 해석해에서 지하수 흐름의 경계면은 시험 구간의 길이와 관련이 있다. 지하수 흐름의 경계면에 대해 l/r 을 0.1~10까지 조정하고(Moye 해석해는 $l/r = 2$ 로 가정), 시험 구간의 길이를 1, 5, 10, 그리고 20 m로 설정하여 도출되는 수리전도도를 도시한 결과, 시험 구간의 크기가 작을수록 도출되는 수리전도도의 차이가 지하수 흐름 경계면의 값에 따라 커지는 것을 알 수 있었다. 즉, 정류 상태의 정압시험결과를 Moye 해석해를 이용하여 해석할 때, 시험 구간의 길이가 클수록 지하수 흐름 차원을 가정하는 조건에서 민감도를 낮출 수 있는 것으로 판단된다.

현장시험 결과, KURT내 시험공의 구간별 수리수두는 심도가 깊어짐에 따라 선형으로 증가하지 않고 불규칙한 분포 양상을 보이고 있다. 그리고 정압시험을 통해 도출한 구간별 투수량계수 또한 매우 불규칙적으로 분포를 보이고 있다. 이러한 수리수두와 투수량계수의 분포 양상은 매질내 지하수의 흐름이 단열계에 의해 지배되는 전형적인 결정질 암반의 수리지질특성을 나타낸다고 판단된다. 정압배출시험 결과 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석 결과는 큰 차이를 보이고 있지는 않으며, 부정류 상태의 해석 결과가 다소 큰 평균값으로 도출되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 $2.0\text{E}-8 \text{ m}^2/\text{sec}$ 보다 작은 투수성을 갖는 매질에서는 정류 상태의 해석 결과가 부정류 상태의 해석 결과에 비해 작은 것을 확인할 수 있는데, 이러한 연구 결과는 $1\text{E}-8 \text{ m/sec}$ 이하의 수리전도도를 갖는 매질에서 부정류 상태의 해석 결과가 정류 상태의 해석 결과보다 크게 산출된다는 기존 연구의 해석 결과와 잘 부합된다. 한편, 연구 결과에서 저투수성 매질의 경우 부정류 상태의 해석 결과가 다소 크게 도출되지만, 정압배출시험의 정류 상태의 해석과 부정류 상태의 해석이 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 기존 연구에서 정류 상태의 시험과 부정류 상태의 시험에서 발생하는 큰 오차는 주입시험에서 공벽 효과에 의한 초기 주입량의 측정 오차나 투수성이 낮은 시험 구간에서 유량계의 정밀도에 의해 발생하는 주입량의 측정 오차에 대한 가능성을 제시할 수 있다.

본 논문의 결과를 고찰해 보았을 때, 결정질 암반에서 수행한 정압시험 해석시 Moye 방법을 적용하기 위해서는 시험

구간의 길이를 작게 설정하는 것보다는 가능한 시험 조건에서 크게 설정하여 현장수리시험을 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다. 특히 정압주입시험시 시추공벽 효과를 고려해야하는데, 시험 초기에 시험구간으로 과다하게 주입되는 유량 자료에 대해 표준곡선중첩법이나 직선법을 이용하여 해석할 때 제외하여 해석하는 것이 바람직하다. 또한, 결정질 암반에서 정압시험을 해석할 때, 단순히 정류 상태의 해석으로 매질의 수리지질특성을 판단하기보다는 정류 상태의 해석에서 수반되는 가정 조건을 고려하여 부정류 상태의 시험 결과와 함께 비교하여 해석한다면 매질의 수리지질특성을 보다 잘 이해 할 수 있을 것으로 사료된다.

Moye의 식을 이용한 정압시험의 해석은 패커시험에서 가장 흔하게 사용하는 방법이지만, 이는 지하수 흐름의 유동 경계에 대한 가정에 근거한 것으로 정확히 수학적으로 설명되지 않는다. 엄밀한 분석을 위해서는 단열의 구조와 연결성을 반영하거나 시험정 주변 결정질 암반의 프랙탈 차원 적용 등 보다 더 엄밀한 수학적 전개가 필요할 수 있지만, 이 연구는 실제 현장에서 사용되는 방법으로 해석할 때의 고려할 문제를 살펴보는 차원으로 수행되었다. 우리가 결정질 암반에서 수행하는 현장수리시험을 정확히 해석하기 위해서는 시험 구간내 발달한 단열의 정보와 수리 자극이 미치는 영향 범위내에서 단열간의 연결성 충분히 파악하여 수치적인 방법으로 접근할 수 있을 것이다. 그러나, 위의 내용을 모두 파악했다고 하더라도 지하수가 일부 단열에서만 선택적으로 흐른다는 점은 현장수리시험의 해석에 불확실성을 야기시키고 있다. 이렇게 현재까지 단열 암반 매질에서의 지하수 유동을 명확히 설명할 수 있는 이론적 바탕이 제시되지 못하고 있는 가운데, 본 연구에서처럼 결정질 암반을 대상으로 수행한 정압시험에 대해 등방성의 균질한 수리지질특성을 가정하여 해석하는 것은 일반적으로 접근 가능한 방법이라고 할 수 있을 것이다.

사사

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다(No. 2021M2E1A1085200).

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, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 179p.
- Andersson, J.E., Persson, O., 1985, Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB TR 85-19, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 17p.
- Barker, J.A., 1988, A generalized radial flow model for pumping tests in fractured rock, Water Resources Research, 24, 1796-1804.
- Berkowitz, B., Bour, O., Davy, P., Odling, N., 2000, Scaling of fracture connectivity in geological formations, Geophysical Research Letter, 27(14), 2061-2064.
- Bour, O., Davy, P., Darcel, C., Odling, N., 2002, A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway), Journal of Geophysical Research, 107(B6), 2113.
- Braester, C., 1982, Numerical simulation of double packer tests. Calculation of rock permeability, SKB TR 82-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 37p.
- Cinco-Ley, H., Samaniego-V, F., 1981, Transient pressure analysis for fractured wells, Journal of Petroleum Technology,

- 33(9), 1749-1766.
- Dagan, G., 1979, Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations, *Water Resources Research*, 15(1), 47-63.
- de Marsily, G.h., Delay, F., Goncalves, J., Renard, P.h., Teles, V., Violette, S., 2005, Dealing with spatial heterogeneity, *Hydrogeology Journal*, 13, 161-183.
- Doe, T., Remer, J., 1981, Analysis of constant-head well tests in nonporous fractured rock, *Proceedings of the 3rd Invitational Well-Testing Symposium*, Berkeley, 84-89.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, 604p.
- Jacob, C.E., Lohman, S.W., 1952, Non-steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, *Transactions American Geophysical Union*, 33(4), 559-569.
- 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, K.S., Kim, C.S., Bae, D.S., 2002, Estimation of the effective hydraulic conductivity in the granite area as an equivalent continuum medium, *The Journal of Engineering Geology*, 12(3), 319-332 (in Korean with English abstract).
- Kuusela-Lahtinen, A., Niemi, A., Luukkonen, A., 2003, Flow dimension as an indicator of hydraulic behavior in site characterization of fractured rock, *Groundwater*, 41(3), 333-341.
- Moye, D.G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, *Civil Engineering Transactions*, Institution of Engineers, Australia, CE9(1), 95-100.
- Neuman, S.P., 2005, Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, *Hydrogeology Journal*, 13(1), 124-147.
- Park, K.W., Ji, S.H., Ko, N.Y., 2019, Assessment of hydrogeological characteristics at BDZ-1 borehole in KAERI Underground Research Tunnel (KURT), KAERI/TR-7750/2019, Korea Atomic Energy Research Institute, 84p.
- 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).
- Snow, D., 1965, A parallel plate model of fractured permeable media, Ph.D. Thesis, University of California, 662p.
- Ziegler, T., 1976, Determination of rock mass permeability, Technical Report S-76-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 85p.